



**Universidade de
Aveiro
2018**

Departamento de Engenharia Mecânica

**Ricardo Filipe da Cruz Tomás Incorporação de rota de atravessamento para
veículos autónomos em ferramentas de modelação**



**Ricardo Filipe da Cruz Tomás Incorporação de rota de atravessamento para
veículos autónomos em ferramentas de modelação**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica da Professora Doutora Margarida Isabel Cabrita Marques Coelho, Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, e do Doutor Paulo Jorge Teixeira Fernandes, Equiparado a Investigador Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

O júri

Presidente

Prof. Doutor José Paulo Oliveira Santos

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Coorientador

Doutor Paulo Jorge Teixeira Fernandes

Equiparado a Investigador Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Arguente

Prof. Doutor Joaquim Miguel Gonçalves Macedo

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Agradecimentos

Em primeiro quero agradecer à minha orientadora, a Professora Doutora Margarida Coelho, pela orientação, colaboração e apoio ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu coorientador, o Doutor Paulo Fernandes, quero deixar um agradecimento muito especial pela ajuda constante em todo o trabalho, desde a ajuda na parte experimental, esclarecimentos de toda a temática relativa a este trabalho e por todo o tempo e disponibilidade que teve para comigo.

À Doutora Eloisa Macedo um obrigado pela disponibilidade e colaboração na criação do código Matlab necessário neste trabalho para a aplicação da metodologia das emissões.

À Doutora Ana Cristina Aguiar, professora auxiliar do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, deixo o meu agradecimento pela disponibilização dos dados relativos aos volumes de tráfego da cidade do Porto, e que permitiram a realização do estudo pretendido com uma base de dados fidedigna e notável.

Quero também agradecer a todas as pessoas e entidades que de alguma forma contribuíram para a realização e concretização deste trabalho.

Aos meus pais, quero agradecer por todo o apoio que sempre me deram ao longo da minha vida e que me permitiu atingir sempre os meus objetivos, pela ajuda e pela paciência.

Este trabalho insere-se igualmente no âmbito dos seguintes projetos: @CRUISE (PTDC/EMS-TRA/0383/2014), financiado no âmbito do Projeto 9471 – Reforçar a Investigação, o Desenvolvimento Tecnológico e a Inovação (Projeto 9471 – RIDTI) e participado pelo Fundo Comunitário Europeu FEDER; MobiWise (POCI-01-0145-FEDER-016426); DICA-VE (POCI-01-0145-FEDER-029463); inFLOWence (POCI-01-0145-FEDER-029679); Projeto Estratégico UID-EMS-00481-2013-FCT e CENTRO-01-0145-FEDER-022083

Palavras-chave

Emissões, Modelação, Sistemas Inteligentes de Transportes, Veículos autónomos, Tráfego

Resumo

Esta Dissertação de Mestrado tem como principal objetivo incluir novos critérios de definição de escolha de rotas em veículos autónomos (VA) numa rede urbana pertencente a uma área metropolitana usando ferramentas de modelação de tráfego e emissões.

Assim, foi feita a caracterização da rede viária relativa à cidade do Porto de forma a identificar as zonas potenciais onde a mobilidade autónoma possa ser implementada. Posteriormente, foram comparados cenários relativos a taxas de penetração de VA na rede face à situação atual de veículos convencionais em termos das emissões de dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), óxidos de azoto (NO_x) e hidrocarbonetos (HC), e ainda velocidade média, atraso relativo e densidade.

Para atingir os objetivos desta dissertação, foi utilizado um modelo microscópico de tráfego rodoviário (VISSIM) e uma metodologia de cálculo de emissões de poluentes baseada na potência específica dos veículos (VSP).

A monitorização experimental consistiu na recolha de dados de volumes de tráfego ao longo da rede, e ainda na análise da dinâmica do veículo (velocidade e aceleração/desaceleração) para a calibração e validação do modelo de tráfego.

Os cenários avaliados foram relativos a diferentes taxas de penetração de VA que atravessam a Via de Cintura Interna (VCI): 1) 10% VA; 2) 20% VA; 3) 30% VA; e 4) 50% VA.

Os resultados sugerem que a penetração de VA na VCI permitem a redução das emissões absolutas dos diferentes poluentes (entre os 3% e 4%, de acordo com o poluente analisado) no domínio de estudo. No que diz respeito aos parâmetros de desempenho, foram observados aumentos da velocidade média (até 5% para veículos convencionais e 4% para autocarros urbanos) e diminuições nos atrasos relativos (até 16% para os veículos convencionais e 12% para os autocarros urbanos).

Na VCI apesar do aumento do volume de tráfego nos cenários alternativos e consequente aumento das emissões absolutas, verificou-se uma redução das emissões locais (6% e 11% para o CO_2 e NO_x , respetivamente), o que se deveu aos parâmetros de condução (menos agressivos) dos VA, e, portanto, uma condução mais de acordo com critérios ambientais.

Para além disso, verificou-se que os veículos autónomos têm a capacidade de diminuir o tempo de evacuação de uma via, mesmo quando se aumenta o volume de tráfego na mesma.

Keywords

Emissions, Modeling, Intelligent Transport Systems, Autonomous vehicles, Traffic

Abstract

The main objective of this Master Dissertation is to include new route choice criteria in Autonomous Vehicles (AV) along a freeway corridor in a metropolitan area using a microscopic traffic model paired with an emission methodology. Thus, the road network of Porto was characterized to identify the potential areas where autonomous mobility could be implemented. Subsequently, mobility scenarios regarding AV penetration rates were compared to current situation (conventional vehicles only) in terms of carbon dioxide (CO₂), carbon monoxide (CO), nitrogen oxides (NO_x) and hydrocarbon (HC) vehicular emissions, as well as average speed, relative delay and density. To accomplish the posed objectives, a microscopic traffic model (VISSIM) and an emission methodology based on vehicle specific power were used (VSP). Traffic volumes and vehicle dynamic (speed and acceleration/deacceleration on a second-by-second basis) data were collected from the studied locations, and then the modelling tool was calibrated and validated for the baseline scenario.

The following scenarios concerning the different AV penetration rates for through traffic along Via de Cintura Interna (VCI) were implemented: 1) 10% AV; 2) 20% AV; 3) 30% AV; and 4) 50% AV.

The results suggested that the AV penetration in the VCI reduced vehicular emissions (between 3% and 4%, depending on the pollutant) in the study domain compared to the existing situation. Concerning the traffic performance parameters, average speed increased (up to 5% for conventional vehicles and 4% for transit buses) and relative delay decreased (up to 16% for conventional vehicles and 12% for transit buses).

Despite the increase in traffic volumes in the alternative scenarios and increased in emissions, a reduction of emissions per unit distance (6% and 11% for CO₂ and NO_x, respectively) was observed in the VCI. This was mostly due to the AV driving behavior parameters (smooth driving).

Furthermore, it was found that AV have the capacity to decrease the evacuation time of a route, even when the volume of traffic is higher.

Índice

Índice de Tabelas.....	III
Índice de Figuras	V
Índice de Nomenclaturas.....	IX
1. Introdução	1
1.1. Impacto do sector dos transportes	1
1.2. Medidas para uma melhor eficiência do sistema de transportes.....	7
1.3. Mobilidade Autónoma	8
1.4. Objetivos.....	11
1.5. Estrutura da Dissertação	11
2. Revisão Bibliográfica	13
3. Metodologia.....	19
3.1. Modelação de tráfego.....	21
3.1.1. Comportamento do condutor	22
3.1.2. Escolha de rotas.....	22
3.2. Metodologia de Emissões.....	23
3.3. Estudo de Caso.....	24
3.4. Monitorização Experimental.....	26
3.5. Conceção da Rede e Modelação de Tráfego	31
3.6. Seleção do período de análise	38
3.7. Calibração e Validação	40
3.8. Estabelecimento de Cenários e Obtenção de dados	44
4. Apresentação e Discussão dos Resultados.....	51
4.1. Identificação dos pontos críticos da rede em termos de emissões	51
4.2. Comparação das emissões e do desempenho de tráfego entre cenários	60
5. Conclusões e Trabalhos Futuros.....	67
Referências Bibliográficas	71
Anexos.....	77

Índice de Tabelas

Tabela 1: Previsão das percentagens de venda de VA [27].	10
Tabela 2: Calendarização das tarefas a realizar ao longo do semestre, para a realização da Dissertação de Mestrado.	20
Tabela 3: Modos VSP (Nota: Valores de VSP em kW/ton) [57] [58].	24
Tabela 4: Nós da rede e a sua localização.	26
Tabela 5: Volumes de tráfego médio diário mensal nos pontos de acesso à rede pela VCI [64].	28
Tabela 6: Características das rotas (Nota: Tempo de viagem esperado retirado do GoogleMaps).	28
Tabela 7: Tabela da recolha da dinâmica do veículo.	31
Tabela 8: Volumes de tráfego em dias tipicamente úteis no período de ponta da manhã e no período de ponta da tarde, em intervalos de 30 minutos.	39
Tabela 9: Resultados da calibração dos tempos de viagem.	43
Tabela 10: Parâmetros utilizados nos veículos autónomos (com utilização do modelo de Wiedemann 99) comparativamente aos usados nos veículos convencionais (valores padrão Wiedemann 74).	46
Tabela 11: Contribuição das principais zonas da rede para as emissões absolutas da mesma.	60
Tabela 12: Resultados obtidos para as emissões de CO ₂ , CO, NO _x e HC em gramas, em todo o domínio de estudo.	61
Tabela 13: Resultados obtidos para as emissões de CO ₂ e NO _x em g/km por veículo, em todo o domínio de estudo.	61
Tabela 14: Resultados obtidos para as emissões de CO ₂ , CO, NO _x e HC em gramas, na VCI.	62
Tabela 15: Resultados obtidos para as emissões de CO ₂ e NO _x em g/km por veículo, na VCI.	62
Tabela 16: Contribuição das emissões absolutas da VCI para o domínio de estudo, no cenário base	63
Tabela 17: Resultados obtidos para a velocidade média e atraso relativo médio, no domínio de estudo.	63
Tabela 18: Resultados obtidos para a velocidade média (km/h) e atraso relativo, na VCI.	64
Tabela 19: Resultados obtidos para a densidade média no domínio de estudo.	65
Tabela 20: Resultados obtidos para a densidade média na VCI.	65
Tabela A.1: Tempos de partida dos autocarros no sentido normal, em segundos [66].	77
Tabela A.2: Tempos de partida dos autocarros no sentido inverso, em segundos [66].	78
Tabela A.3: Resultados da calibração dos volumes de tráfego.	79
Tabela A.4: Resultados da validação dos volumes de tráfego.	80
Tabela A.5: Comparação das emissões do cenário alternativo 1 relativamente ao cenário base e teste de significância com nível de significância de 5%.	81
Tabela A.6: Comparação das velocidades médias, atrasos relativos e densidades médias entre o cenário alternativo 1 e o cenário base, e teste de significância com nível de significância de 5%.	82
Tabela A.7: Comparação das emissões do cenário alternativo 2 relativamente ao cenário base e teste de significância com nível de significância de 5%.	83
Tabela A.8: Comparação das velocidades médias, atrasos relativos e densidades médias do cenário alternativo 2 com o cenário base, e teste de significância com nível de significância de 5%.	84
Tabela A.9: Comparação das emissões para o cenário alternativo 3 relativamente ao cenário base, e teste de significância com nível de significância de 5%.	85

Tabela A.10: Comparação das velocidades médias, atrasos relativos e densidades médias entre o cenário alternativo 3 e o cenário base, e teste de significância com nível de significância de 5%.....	86
Tabela A.11: Comparação das emissões entre o cenário alternativo 4 e o cenário base, e teste de significância com nível de significância de 5%.....	87
Tabela A.12: Comparação das velocidades médias, atrasos relativos e densidades médias entre o cenário alternativo 4 e o cenário base, e teste de significância com nível de significância de 5%.....	88

Índice de Figuras

<i>Figura 1: Escolha dos tipos de energia pelos UE-28, em 2015 [2].</i>	1
<i>Figura 2: Distribuição do consumo de energia final por setor de atividade na UE-28 em 2016 [5].</i>	2
<i>Figura 3: Distribuição do consumo de energia final no setor de transportes na UE-28, em 2016 [6].</i>	2
<i>Figura 4: Evolução da utilização dos meios de transporte pelos UE-28 [9].</i>	3
<i>Figura 5: Distribuições das emissões de GEE por modo de transporte, em 2015 [8].</i>	4
<i>Figura 6: Distribuições das emissões de GEE no setor rodoviário, em 2015 [8].</i>	4
<i>Figura 7: Impacto da diferença de velocidade na emissão dos diferentes poluentes em relação a uma velocidade de 100 km/h [14].</i>	6
<i>Figura 8: Rede de transportes ligada através de Sistemas Inteligentes de Transportes [17].</i>	7
<i>Figura 9: Níveis de automação dos VA [21].</i>	9
<i>Figura 10: Potencial evolução dos VA para as próximas décadas (adaptado) [27].</i>	10
<i>Figura 11: Fluxograma com a metodologia aplicada na realização deste trabalho de Dissertação.</i>	19
<i>Figura 12: Baixa do Porto e a rede criada (Fonte: OpenStreetMaps).</i>	25
<i>Figura 13: Nós das espiras na rede criada no VISSIM (Fonte: OpenStreetMaps).</i>	27
<i>Figura 14: Vias com ligação à VCI e de acesso à rede (Fonte: OpenStreetMaps).</i>	27
<i>Figura 15: Rota 1, origem nos Jardins do Palácio de Cristal e destino a Loja do Cidadão (Fonte: Google Maps).</i>	29
<i>Figura 16: Rota 2, origem na Loja do Cidadão e destino o Palácio de Cristal (Fonte: Google Maps).</i>	29
<i>Figura 17: Rota 3, origem no Crowne Plaza e destino a Praça do Doutor Francisco Sá Carneiro (Fonte: Google Maps).</i>	29
<i>Figura 18: Rota 4, origem na Praça do Doutor Francisco Sá Carneiro e origem a Direção do Ambiente da Câmara municipal do Porto (Fonte: Google Maps).</i>	30
<i>Figura 19: Rota 5, origem na Avenida da Associação Empresarial de Portugal e origem o Crowne Plaza (Fonte: Google Maps).</i>	30
<i>Figura 20: Exemplo das características de um "Link" com um dado tipo de comportamento do condutor.</i>	32
<i>Figura 21: Rede modelada do domínio de estudo no modelo de tráfego VISSIM.</i>	32
<i>Figura 22: Utilização da ferramenta "Desired Speed Decisions".</i>	33
<i>Figura 23: Utilização da ferramenta "Reduced Speed Areas".</i>	33
<i>Figura 24: Utilização da ferramenta "Conflict Areas".</i>	34
<i>Figura 25: Utilização da ferramenta "Signal Heads".</i>	35
<i>Figura 26: Utilização da ferramenta "Public Transport Stops" para a criação das paragens de autocarro.</i>	35
<i>Figura 27: Utilização da ferramenta "Public Transport Lines" para a criação das linhas de autocarro.</i>	36
<i>Figura 28: Tempos de partida dos autocarros.</i>	37
<i>Figura 29: Definição das vias dedicadas ao transporte coletivo.</i>	37
<i>Figura 30: Criação dos volumes de tráfego usando a ferramenta "Vehicle Inputs".</i>	38
<i>Figura 31: Volumes de tráfego em dias tipicamente úteis em horas de ponta, em períodos de 30 em 30 minutos.</i>	39
<i>Figura 32: Utilização da ferramenta "Nodes" para a criação dos nós na rede.</i>	40
<i>Figura 33: Utilização da ferramenta "Evaluation" para recolha dos volumes de tráfego nos nós criados na rede.</i>	41
<i>Figura 34: Utilização da ferramenta "Node Results" para controlo dos volumes de tráfego nos nós do modelo.</i>	41

Figura 35: Gráfico de dispersão da calibração dos volumes de tráfego do modelo, no período entre as 17h30 e as 18h30.	42
Figura 36: Gráfico de dispersão da validação dos volumes de tráfego do modelo, no período entre as 17h30 e as 18h30.	44
Figura 37: Criação do comportamento de condução alterando os 10 parâmetros do modelo de Wiedemann para a criação de VA na rede.....	47
Figura 38: Alteração dos parâmetros de mudança de via no comportamento de condução dos VA.	47
Figura 39: Configuração da ferramenta "Simulation Parameters" com os parâmetros de simulação pretendidos.	48
Figura 40: Configuração da ferramenta "Evaluation Configuration" para a recolha dos dados dos veículos nas simulações.	49
Figura 41: Escolha dos tipos de veículos que é pretendido fazer a recolha dos dados nas simulações.	49
Figura 42: Escolha das variáveis a serem recolhidas nos dados extraídos das simulações do VISSIM.	50
Figura 43: Mapa de emissões de CO ₂ da rede, em gramas.....	52
Figura 44: Mapa de emissões de CO ₂ na Praça de Mouzinho de Albuquerque (Rotunda da Boavista), em gramas.....	52
Figura 45: Mapa de emissões de CO ₂ na entrada da rede pela ponte da Arrábida, em gramas.....	52
Figura 46: Mapa de emissões de CO ₂ na Avenida da AEP, em gramas.	52
Figura 47: Mapa de emissões de CO ₂ na Avenida dos Aliados e junto ao Jardim de João Chagas (Cordoaria), em gramas.	52
Figura 48: Mapa de emissões de CO ₂ no acesso à rede pelo Mercado Abastecedor, em gramas. ..	53
Figura 49: Mapa de emissões de CO ₂ na Rua do Monte de Burgos e Rua do Amial, em gramas.....	53
Figura 50: Mapa de emissões de CO ₂ na Praça do Marquês de Pombal, Rua da Constituição e na Rua de Egas Moniz, em gramas.....	53
Figura 51: Mapa de emissões de CO ₂ na rede, em g/km por veículo.....	54
Figura 52: Mapa de emissões de CO ₂ na Praça de Mouzinho de Albuquerque (Rotunda da Boavista), em g/km por veículo.....	54
Figura 53: Mapa de emissões de CO ₂ na Avenida da AEP, em g/km por veículo.....	54
Figura 54: Mapa de emissões de CO ₂ na Avenida dos Aliados e junto do Jardim de João Chagas (Cordoaria), em g/km por veículo.	54
Figura 55: Mapa de emissões de CO ₂ no acesso pelo Mercado Abastecedor, em g/km por veículo.	54
Figura 56: Mapa de emissões de CO ₂ na Rua do Monte de Burgos e Rua do Amial, em g/km por veículo.....	55
Figura 57: Mapa de emissões de CO ₂ na Praça do Marquês de Pombal, Rua da Constituição e na Rua de Egas Moniz, em g/km por veículo.....	55
Figura 58: Mapa de emissões de NO _x na rede, em gramas.....	56
Figura 59: Mapa de emissões de NO _x na Praça de Mouzinho de Albuquerque (Rotunda da Boavista), em gramas.....	56
Figura 60: Mapa de emissões de NO _x no acesso à rede pela ponte da Arrábida, em gramas.....	56
Figura 61: Mapa de emissões de NO _x na Avenida da AEP, em gramas.....	56
Figura 62: Mapa de emissões de NO _x na Avenida dos Aliados e junto ao Jardim de João Chagas (Cordoaria), em gramas.	56
Figura 63: Mapa de emissões de NO _x no acesso à rede pelo Mercado Abastecedor, em gramas. ..	57
Figura 64: Mapa de emissões de NO _x na Rua do Monte de Burgos e Rua do Amial, em gramas. ...	57
Figura 65: Mapa de emissões de NO _x na Praça do Marquês de Pombal, na rua da Constituição e na rua de Egas de Moniz, em gramas.	57

Figura 66: Mapa de emissões de NO _x na rede, em g/km por veículo.	57
Figura 67: Mapa de emissões de NO _x na Praça de Mouzinho de Albuquerque (Rotunda da Boavista), em g/km por veículo.....	58
Figura 68: Mapa de emissões de NO _x no acesso pela ponte da Arrábida, em g/km por veículo.	58
Figura 69: Mapa de emissões de NO _x na Avenida da AEP, em g/km por veículo.....	58
Figura 70: Mapa de emissões de NO _x na Avenida dos Aliados e junto do Jardim de João Chagas (Cordoaria), em g/km por veículo.	58
Figura 71: Mapa de emissões de NO _x no acesso pelo Mercado Abastecedor, em g.km por veículo.	58
Figura 72: Mapa de emissões de NO _x na Rua do Monte de Burgos e Rua do Amial, em g/km por veículo.....	58
Figura 73: Mapa de emissões de NO _x na Praça do Marquês de Pombal, na rua da Constituição e na Rua de Egas de Moniz, em g/km por veículo.....	59

Índice de Nomenclaturas

a – Aceleração
A20 – Circular Regional Interior do Porto
A28 – Autoestrada do Norte Litoral
A4 – Autoestrada Transmontana
ADAS – Sistemas Avançados de Assistência ao Condutor
AEP – Avenida da Associação Empresarial de Portugal
BUS – Autocarros urbanos
c – Volume de tráfego observado
CAV – Veículos conectados e autónomos
CC0 – “*Stopped Condition Distance*” (Distância de paragem relativa ao veículo da frente)
CC1 – “*Headway Time*” (fator que controla a velocidade relativa à distância de segurança)
CC3 – “*Threshold for entering ‘Following’*” (momento em que o condutor inicia a desaceleração até chegar à distância de segurança)
CC4 e CC5 – “*‘Following’ Thresholds*” (parâmetros que controlam a velocidade quando o veículo segue atrás de outro)
CC7 – “*Oscillation Acceleration*” (aceleração de oscilação)
CC8 – “*Standstill Acceleration*” (capacidade de aceleração do veículo quando este se encontra parado)
CC9 – “*Acceleration at 80 km/h*” (capacidade de aceleração do veículo quando este circula a 80 km/h)
CO – Monóxido de carbono
CO₂ - Dióxido de carbono
GEE - Gases do Efeito de Estufa
GEH – Índice Geoffrey E. Havers
GNSS – Sistema de Navegação por Satélite
GPS – Sistema de Posicionamento Global
HC - Hidrocarbonetos
ITS – Sistemas Inteligentes de Transportes (“*Intelligent Transport Systems*”)
LDV – “*Light Duty Vehicle*” (Veículo Ligeiro)
m – Volume de tráfego simulado
Matriz OD – Matriz Origem – Destino
MOVES – “*The Motor Vehicle Emission Simulator*”
N14 – EN14-Estrada do Baixo Minho
NO_x – Óxidos de Azoto
OD – Origem- Destino
PM – Partículas em suspensão
R² – Coeficiente de determinação
R-Line – Research LINE – *source dispersion model for near-surface releases*
SO₂ – Dióxido de enxofre
SSAM – “*Surrogate Safety Assessment Model*”
STCP – Sociedade de Transportes Coletivos do Porto
SUMO – “*Simulation of Urban Mobility*”
TMDM – Tráfego Médio Diário Mensal
TSDC – “*Transportation Secure Data Center*”
UE-28 - 28 Estados Membros da União Europeia
v – Velocidade
V/C – Relação de débito e capacidade

V2I – “*Vehicle to Infrastructure*” (Veículo para Infraestrutura)
V2V – “*Vehicle to Vehicle*” (Veículo para Veículo)
VA – Veículos Autônomos
VCI – Via de Cintura Interna
VISSIM – “*Verkehr In Städten – SIMulationsmodell*” (Tráfego em cidades – modelo de simulação)
Vph – Veículos por hora
VSP – “*Vehicle Specific Power*” (Potência Específica do Veículo)

1. Introdução

Neste capítulo, é descrito o impacto do setor dos transportes ao nível dos consumos energéticos e emissões de poluentes. Posteriormente, são apresentadas medidas para a obtenção de uma melhor eficiência do sistema de transportes e enquadramento da mobilidade autónoma. Finalmente, são estabelecidos os principais objetivos desta Dissertação de Mestrado bem como a estrutura da mesma.

1.1. Impacto do sector dos transportes

Com as crescentes preocupações com as alterações climáticas e de modo a diminuir os impactos associados aos poluentes e emissões de gases com efeito de estufa (GEE), tem havido uma maior preocupação por parte dos países da União Europeia (UE-28) relativamente aos métodos e utilização eficiente da energia nos diferentes setores de atividade [1].

A Figura 1 mostra que os combustíveis fósseis constituem uma das fontes predominantes de energia (em 2015, 31% do consumo energético era associado a produtos petrolíferos e 11% associado a combustíveis sólidos, o que equivalia 42% dos tipos de energia utilizados). No entanto a UE-28 depende cada vez menos dos mesmos, tendo-se verificado um aumento de 9% para 17% na utilização de energias renováveis entre 2005 e 2015 [1].

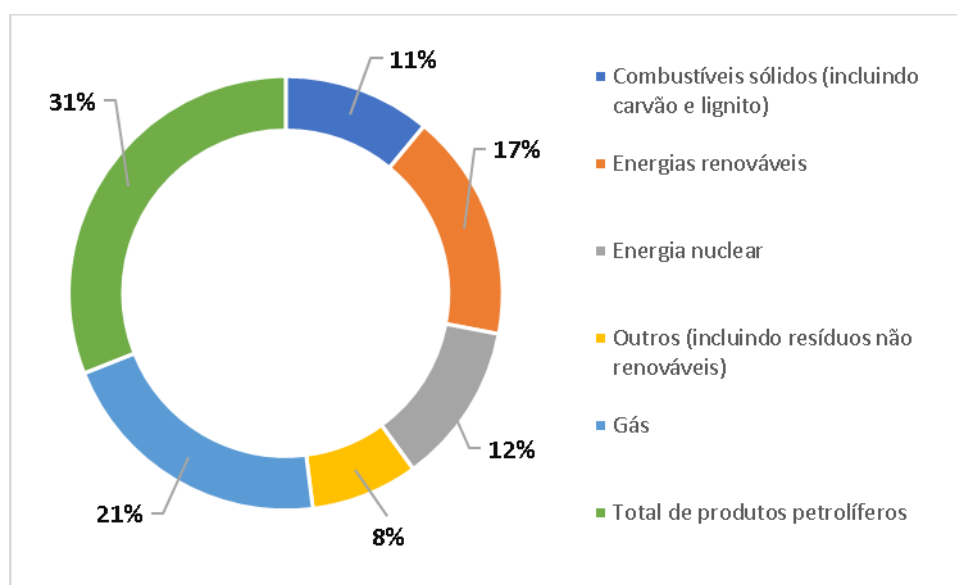


Figura 1: Escolha dos tipos de energia pelos UE-28, em 2015 [2].

Com isto, verificou-se que entre 2005 e 2014, o consumo de energia final diminuiu 11% nos UE-28, o que se deveu ao desempenho económico, alterações estruturais dos utilizadores finais dos diferentes setores de atividade, e ainda melhor eficiência nos gastos de energia por parte do utilizador final [3]. Entre 1990 e 2014 a eficiência energética dos UE-28 aumentou 28%, com o setor

dos transportes a registar aumentos anuais de 0,9% [4]. Refira-se que este setor obteve o menor aumento ao nível da eficiência energética face à indústria (1,8% anualmente) e atividades domésticas (1,7% anualmente) [4].

Analisando a Figura 2, verificou-se que o consumo de energia final na EU-28 no ano de 2016 se deveu principalmente ao setor dos transportes, com uma percentagem associada de 33% [5]. O setor rodoviário representou 82% dos consumos no setor dos transportes, conforme é apresentado na Figura 3 [6].

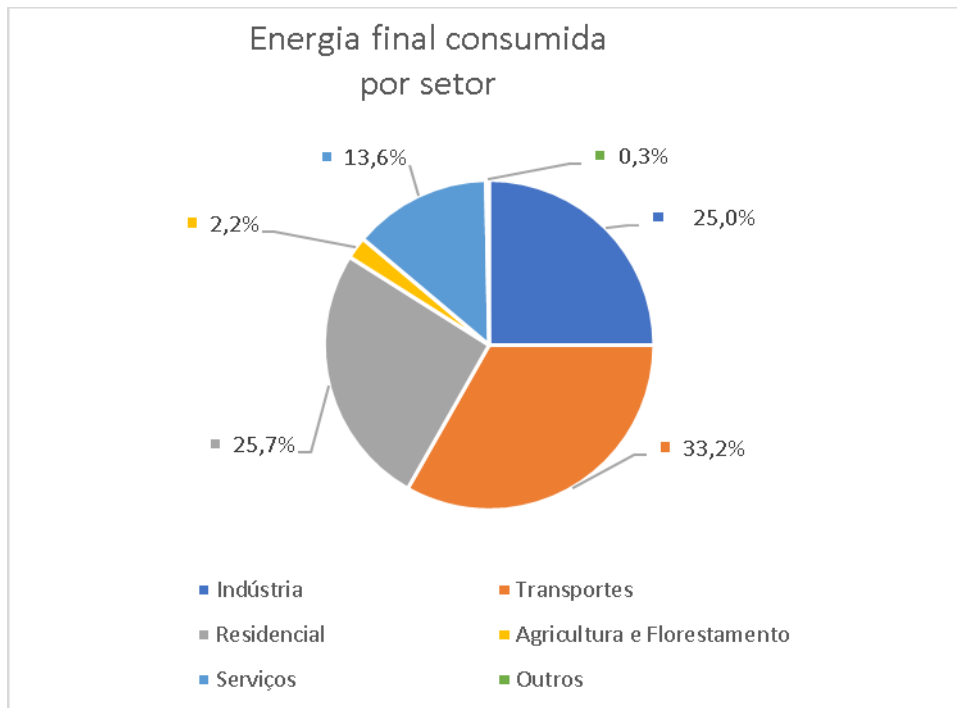


Figura 2: Distribuição do consumo de energia final por setor de atividade na UE-28 em 2016 [5].

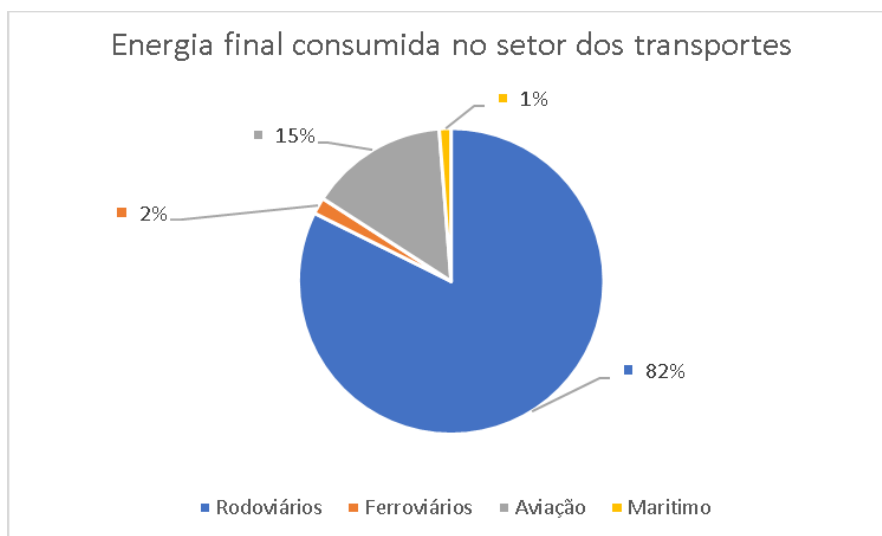


Figura 3: Distribuição do consumo de energia final no setor de transportes na UE-28, em 2016 [6].

Nos países da UE-28 verificou-se que os níveis de emissões de GEE diminuíram 22% entre 1990 e 2016, representando que ultrapassaram o seu objetivo de reduzir em 20% até 2020, comparativamente aos níveis de 1990 [7]. Sendo que o setor dos transportes contribuiu para 27% das emissões totais de GEE em 2016 [8].

O meio de transporte mais utilizado hoje em dia, e de acordo com Figura 4, é o transporte individual de passageiros com uma percentagem de 70 % [9]. Para além disso, observou-se um aumento de 2% e 21% no número de passageiros por quilómetro deste meio de transporte entre 2010 e 2015 e 1995 e 2015, respetivamente [9]. Segundo a Agência Europeia do Ambiente, em 2016 estima-se um aumento de 40% no transporte de passageiros entre 2010 e 2050 [10].

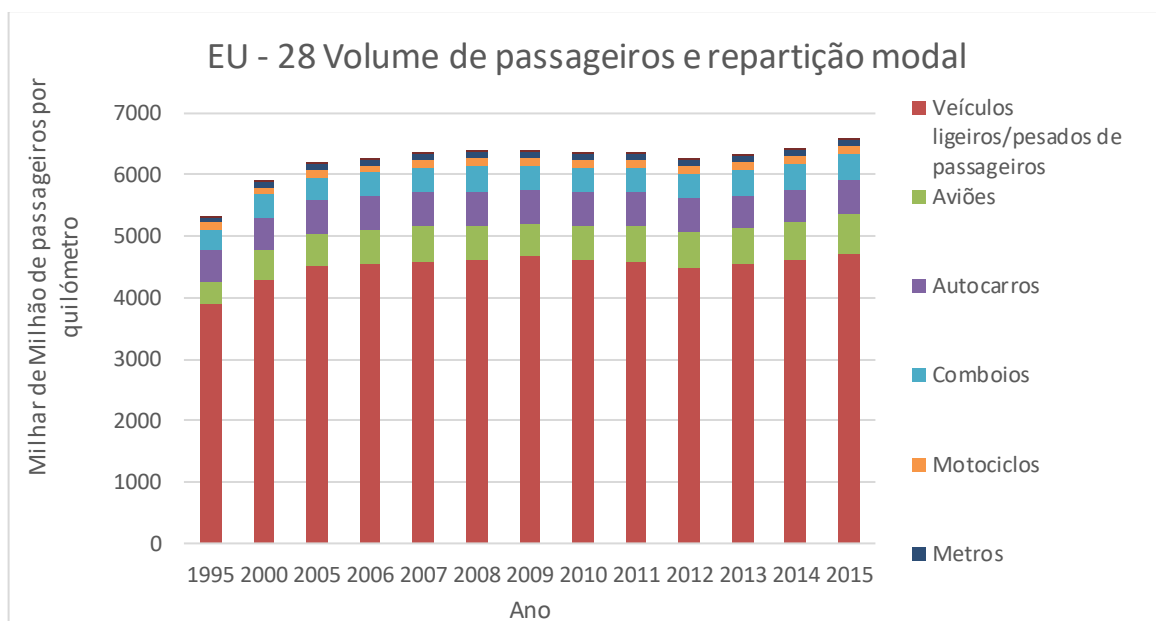


Figura 4: Evolução da utilização dos meios de transporte pelos UE-28 [9].

A nível das emissões de GEE, verifica-se que o setor rodoviário foi o setor com maior percentagem, representando 72,9% das emissões em 2015 (Figura 5) [8], sendo que os veículos ligeiros de passageiros geraram 61% das emissões de GEE (44,4% dos 72,9% das emissões associadas ao setor rodoviário) ao nível da UE-28 (Figura 6) [8].

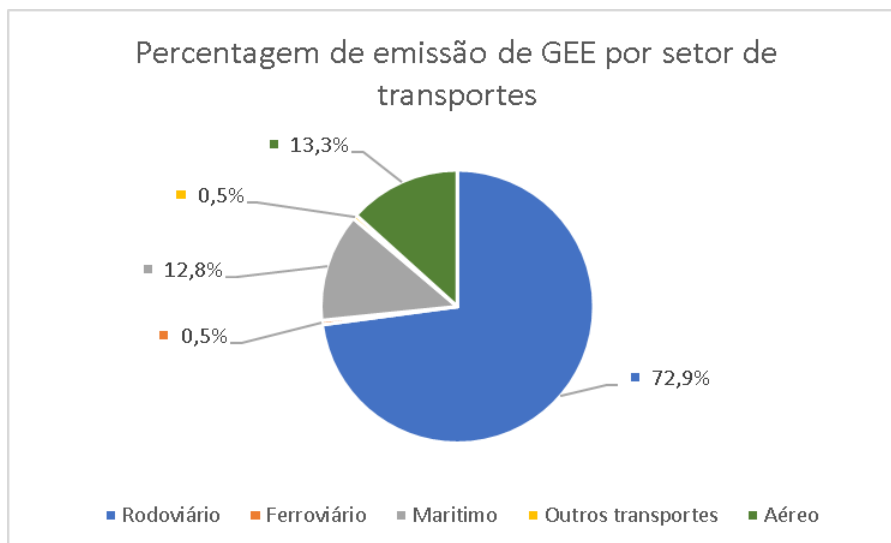


Figura 5: Distribuições das emissões de GEE por modo de transporte, em 2015 [8].

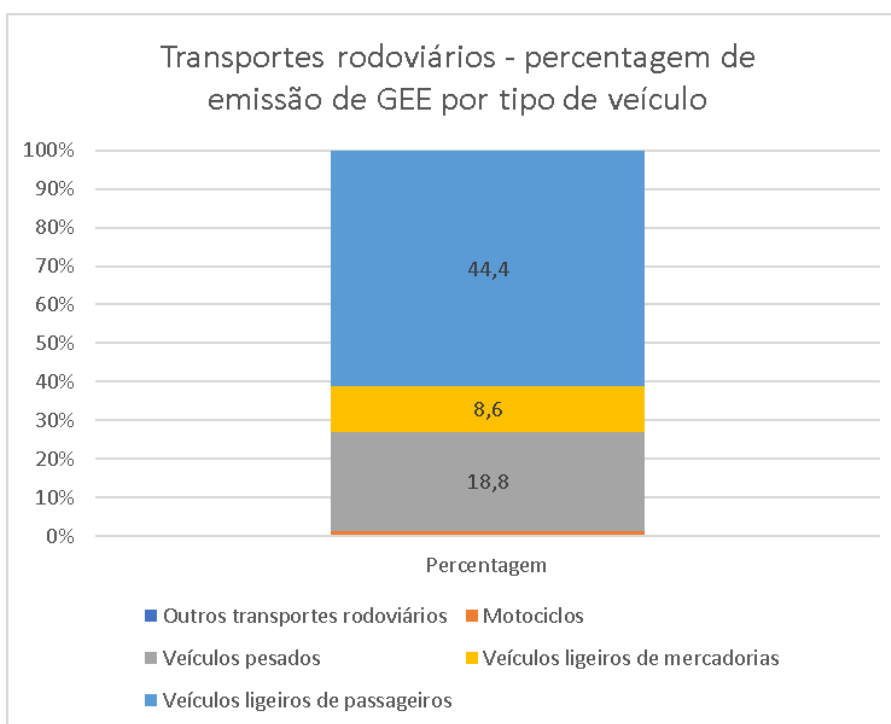


Figura 6: Distribuições das emissões de GEE no setor rodoviário, em 2015 [8].

Assim, os construtores do ramo automóvel têm procurado reduzir os níveis de emissões de poluentes e consumos dos seus modelos, visto contribuir significativamente para a poluição atmosférica através das emissões de dióxido de azoto e de materiais particulados, e serem a principal fonte de poluição sonora [11].

Os veículos vendidos em 2012 na UE-27 apresentaram valores de dióxido de carbono (CO_2) por quilómetro 9% menores face aos valores de 2009 [12].

Esta preocupação dos construtores é extremamente importante, tendo em conta que as emissões de dióxido de carbono no sector dos transportes aumentaram 21% entre 1990 e 2011 e, em 2013, o sector era responsável por 23% das emissões na União Europeia [12]. Em 2017, as emissões médias de CO₂ em veículos ligeiros de passageiros novos vendidos eram de 118,5 g/km, significativamente abaixo da meta de 130 g/km traçada em 2015, mas ainda acima da meta de 95 g/km para o ano de 2021 [13]. Quanto aos novos veículos ligeiros comerciais registados, as emissões médias de CO₂ foram, em 2017, equivalentes a 156,0 g/km e, portanto, bastante abaixo da meta traçada para esse ano, que era de 175 g/km, sendo no entanto ainda superior à meta de 147 g/km de 2021 [14].

Para além dos fatores tecnológicos, existem fatores não tecnológicos tais como medidas de restrição de velocidade, comportamento do condutor e o congestionamento das vias que influenciam os consumos de energia.

Um estudo realizado em 2011 em autoestradas, demonstrou que a diminuição da velocidade limite de 120 para 110 km/h, permitiu uma redução dos consumos de combustível entre 12 e 18% com a tecnologia utilizada nos veículos de passageiros, e assumindo uma condução suave e 100% do respeito dos limites de velocidade [15]. Admitindo que as condições anteriores como demasiado otimistas, verifica-se uma poupança de 2 a 3% [15]. Esta medida foi aplicada em 2011 em Espanha com o objetivo de reduzir o consumo de combustíveis, enquanto que na Holanda e alguns Estados dos Estados Unidos (Kentucky (2007), Utah (2009), Illinois (2014), Ohio (2011) e Texas (2012)) aumentaram a velocidade de 120 para 130 km/h para reduzir o tempo de viagem [16].

Foi concluído que em autoestradas, o limite ideal de velocidade máxima seria abaixo dos 88,5 km/h, mas não muito abaixo por causa da razão entre a velocidade e o consumo de combustível e a razão entre a velocidade e a poluição ser praticamente nula abaixo desta velocidade. Isto levanta algumas dúvidas sobre as motivações dos governos em aumentar e/ou manter os limites de velocidade atuais [16]. Para além disso, é proposto que a utilização de limites de velocidade variáveis ao longo do dia, possa conduzir a uma velocidade máxima ótima [16].

Nos motores a gasóleo verifica-se que os veículos apresentam mais emissões de óxidos de azoto (NO_x) para velocidades acima dos 100 km/h, o que sugere potenciais benefícios caso a velocidade máxima em autoestradas fosse reduzida (Figura 7). Por sua vez, veículos com motores a gasolina, não se verificam variações nas emissões de NO_x para velocidades próximas dos 115 km/h (face a uma velocidade de 100 km/h) [15].

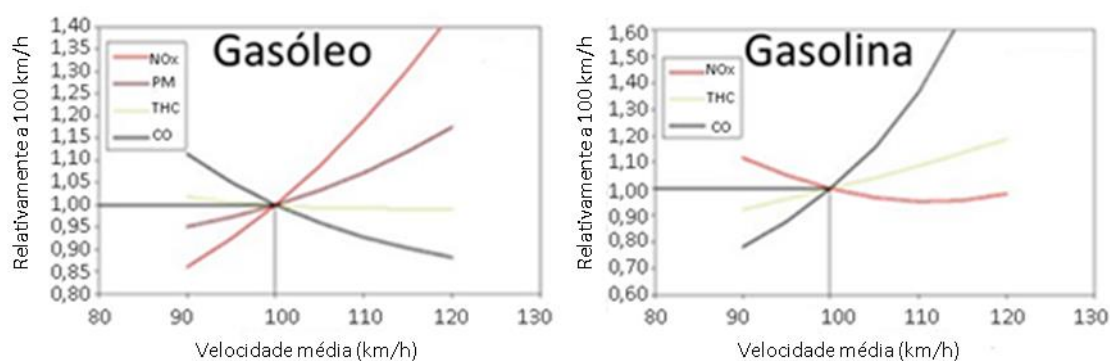


Figura 7: Impacto da diferença de velocidade na emissão dos diferentes poluentes em relação a uma velocidade de 100 km/h [15].

Esta diminuição na velocidade máxima, tem resultados positivos no que concerne à redução nas emissões de poluentes e no aumento da segurança [15]. Sucintamente, verifica-se que a adoção de velocidades entre os 80 e os 90 km/h são ideais ao nível das emissões e consumos de combustível, e logo diminuir a velocidade nas autoestradas poderia ser benéfico [15]. Por outro lado, o argumento principal para a diminuição da velocidade em vias locais é o desejo em obter maior segurança e um ambiente mais calmo, ao invés de preocupações ambientais [15].

Como referido anteriormente, as emissões de GEE e poluentes locais tem relação com o comportamento do condutor [17]. Assim sendo, foram identificados os seguintes tipos de condutores [17]:

- Agressivo e inconstante (tipo 1)
- Conservativo, cuidadoso e aprendiz (tipo 2)
- Profissional e condução suave (tipo 3)
- Experiente e tendência de aceleração (tipo 4)

Estes diferentes tipos de condutores apresentam padrões de velocidade, aceleração e desaceleração que por sua vez afetam a emissão de gases de GEE e os consumos de combustível [17]. Verificou-se que os condutores do tipo 2 diferem significativamente dos outros três tipos relativamente às emissões e consumos de combustível, ou seja, têm pouca tendência a seguir em velocidade de cruzeiro e a praticar velocidades mais baixas [17]. Os condutores do tipo 4 conseguem obter níveis relativamente baixos de emissões e consumos de combustível, mas com viagens mais curtas e menos tendência a adotarem velocidades mais constantes face aos condutores do tipo 2 [17]. No que concerne aos tipos 1 e 4, não apresentaram comportamentos muito distintos entre si apresentando um desempenho pior ao nível das emissões e consumos de combustível [17].

Em virtude desta heterogeneidade ao nível da condução, os programas de simulação de tráfego têm em consideração parâmetros que refletem diferentes padrões de comportamento do condutor [17].

1.2. Medidas para uma melhor eficiência do sistema de transportes

Com o número de veículos novos a continuar em níveis elevados (em 2012, foram registados aproximadamente 12 milhões de veículos na Europa), após ter atingido o pico em 2007 com 15,5 milhões de veículos registados [12], e tendo conta os fatores energéticos e ambientais supracitados, o papel da tecnologia é fundamental para mitigar os impactos negativos do setor do sistema transportes e ainda melhorar a eficiência da infraestrutura existente.

Neste contexto, os Sistemas Inteligentes de Transporte (do acrónimo inglês *"Intelligent Transport Systems"* - ITS) são aplicações avançadas que permitem obter resultados inovadores relacionados com diferentes modos de transporte, e assim tornar a utilização das redes de transporte mais coordenada, segura e inteligente, tal como se pode observar na Figura 8 [18].

Este termo nasceu nos anos 80, quando se começou a reconhecer o impacto que a revolução nas comunicações podia assumir na área dos transportes.

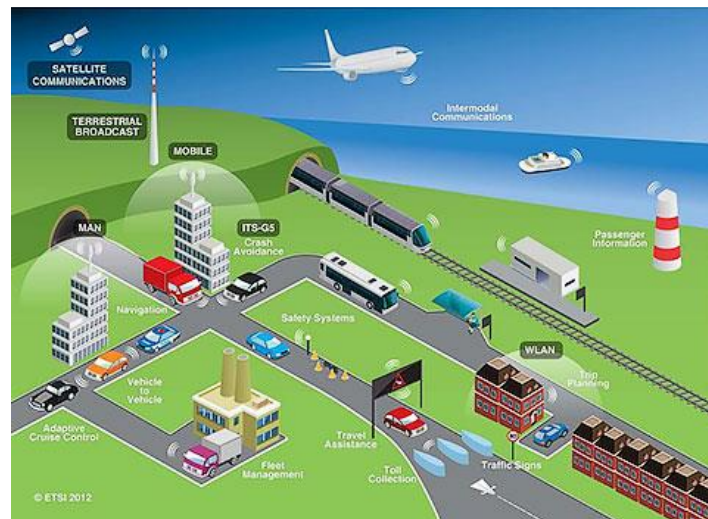


Figura 8: Rede de transportes ligada através de Sistemas Inteligentes de Transportes [18].

Os ITS incluem todos os tipos de comunicação em veículos, entre veículos (V2V) e entre veículos e infraestruturas de tráfego (V2I) [19] [20]. As comunicações V2V permitem ao veículo ter informações sobre os veículos que se encontram em seu redor [19], enquanto que as comunicações V2I permitem obter informações sobre o estado de um sinal luminoso ou a existência de algum incidente na via em tempo real [20].

O crescimento dos ITS tem levado ao desenvolvimento de várias ferramentas de acesso e gestão da informação do veículo, condutor e infraestrutura rodoviária. Um dos exemplos é a monitorização da escolha de rotas feitas cujo fornecimento dos dados através de smartphones pessoais dos diferentes utilizadores da rede (condutores, peão ou ciclistas), e/ou sensores instalados na rede viária, permite uma melhor otimização da mesma. Esta troca de informação tem vários benefícios, tais como: um ciclista selecionar uma rota mais segura, um gestor da rede facilitar o acesso a veículos de emergência numa situação de elevado congestionamento ou um peão evitar rotas com elevados níveis de ruído [18].

O reconhecimento da relevância no transporte rodoviário inerentes ao uso de ITS tem sido feito quer em Portugal, através da Lei nº 32/2013, publicada em Diário da República a 10 de maio, quer ao nível da União Europeia através da Diretiva nº2010/40/EU do Parlamento Europeu e do Conselho, a 7 de julho [18].

O fluxo contínuo de informação do tráfego exige sistemas de armazenamento eficazes e capazes de acomodar quantidades massivas de dados, bem como a otimização dos recursos desses mesmos sistemas. No entanto, os diferentes decisores e utilizadores da rede carecem da informação detalhada e confiável em tempo-real das vulnerabilidades da rede, nomeadamente ao nível da identificação dos seus pontos críticos de acordo com diferentes critérios. Para além disso, o processo de escolha de rotas pode não resultar na redução simultânea das emissões de CO₂ e poluentes locais associados ao tráfego rodoviário [18].

A utilização de ferramentas microscópicas de modelação do tráfego permite uma avaliação eficaz das escolhas de rotas em diferentes tipos de vias (urbana, rural e autoestrada), sendo ainda bastante úteis na avaliação das externalidades associadas ao transporte rodoviário, tais como as emissões de poluentes, conflitos rodoviários ou níveis de ruído.

Estas ferramentas permitem modelar o comportamento do condutor nos diferentes meios de transporte (mais ou menos agressivo na sua abordagem às diferentes situações de trânsito), a introdução de diferentes entidades (veículos ligeiros de passageiros, comboios, autocarros, veículos pesados de mercadorias, bicicletas ou peões), novas formas de mobilidade (autónoma ou conectada) ou ainda, a edição de perfis de velocidades para as diferentes entidades nos vários segmentos da rede de modo a analisar diferentes escolhas de rotas pelos utilizadores da rede.

A conexão destas ferramentas de modelação com sistemas de armazenamento e plataformas de gestão tem bastante potencial como suporte à decisão dos diferentes agentes de transportes e utilizadores da rede, e ainda a avaliação de novas formas de mobilidade como a autónoma e a conectada.

1.3. Mobilidade Autónoma

A utilização dos ITS permitiu o desenvolvimento de aplicações que têm ajudado o desenvolvimento tecnológico e a evolução dos veículos autónomos (VA) e conectados (CAV) [21] [22].

Por mobilidade conectada entende-se como a capacidade de os condutores usarem para sua vantagem alguns dos sistemas de comunicação V2V (como saber o estado do tráfego em tempo real) e V2I (como ter o seu veículo conectado ao sistema de pagamento de portagens). De acordo com a Comissão Europeia, os benefícios dos sistemas cooperativos dos ITS podem conduzir a uma redução dos consumos e emissões de CO₂ de 1,2% anualmente e menos 2,6 biliões de horas perdidas no tráfego até 2030 [21].

Os VA utilizam sensores, atuadores e sistemas de controlo de modo a obter uma condução mais segura e precisa do que qualquer humano seria capaz de o fazer. Assim, esta tecnologia emergente irá afetar todo o sistema de transportes ao nível do consumo de energia, aumento da segurança, diminuição da poluição e diminuição dos congestionamentos no tráfego [22] [23].

A implementação de veículos conectados e autónomos de um sistema de transportes demonstrou grandes reduções no consumo de energia e de emissões de gases GEE [24]. Num sistema de transporte onde são implementados estes veículos, verificou-se uma redução dos consumos de energia entre 16% a 20% tendo em conta apenas o aumento da eficiência de condução e de fluxo de tráfego [24]. Numa rede viária completamente adaptada a veículos conectados e autónomos, obteve-se uma redução de consumo de energia de 67%, enquanto que quando aplicados estes veículos na rede viária atual, se verificou uma redução de 46% [24].

Segundo estudos da Highway Loss Data Institute, sistemas de prevenção de colisões estão a reduzir reivindicações de seguros por parte dos clientes, sendo que reivindicações relacionadas com lesões corporais indicam que estes sistemas estão a funcionar como desejado visto estarem projetados para prevenir ou mitigar a severidade de colisões frontais e traseiras, tendo reduzido a frequência das reivindicações em 4 a 9% [25]. Verificou-se que os resultados foram ainda melhores para sistemas com travagem autónoma, onde se apurou que foram reduzidas 14 a 32% das reivindicações por danos corporais [25].

Na Figura 9 é apresentado os níveis de automação para os veículos automóveis, sintetizando assim também as suas funções.

Nível	Tipo de Automação	Exemplos	Onde é operacional	Se a automação deixar de funcionar
0	Condutor executa parte ou toda a condução			
	Sem condução autónoma	Sem condução autónoma em todo o lado	Nunca	Nunca
	Assistência ao condutor	"Cruise Control" ou centragem na via com supervisão condutor	Poucas vias	Condutor volta a assumir toda a condução
1				
2	Condução autónoma parcial	"Cruise Control" e centragem na via com supervisão condutor	Poucas vias	Condutor volta a assumir toda a condução
3	Sistema de Condução Autónoma executa a tarefa de condução por completo			
	Condução autónoma condicional	Condução autónoma em autoestradas com tráfego denso a baixas velocidades	Áreas e vias limitadas	Condutor assume condução após aviso
	Condução autónoma elevada	Condução autónoma no centro de cidades	Áreas e vias limitadas	Veículo para veículo em segurança
4				
5	Condução autónoma completa	Condução autónoma em todo o lado	Todo o lado em vias	Veículo para veículo em segurança

Figura 9: Níveis de automação dos VA [22].

O nível atual dos VA é o 3, onde é necessária presença obrigatória de um condutor a certo nível [26]. Desde o final de 2017, estão a ser executados testes com veículos sem condutor e assim atingir o nível 4, sendo esperado que a partir do fim de 2018 comecem a aparecer os primeiros veículos [26], apesar de ainda não haver registos desse facto.

Na rede viária da cidade de Magdeburg na Alemanha, foi simulado em VISSIM cenários de implementação de veículos equipados com tecnologia de comunicação e estudado o seu efeito ao

nível da escolha de rota, tendo sido usadas no modelo matrizes origem-destino. Neste estudo, verificou-se que quando foi aumentado o número de veículos equipados de 0% para 40%, gradualmente de 5% em 5%, os tempos de viagem diminuirão à medida que se aumentou a percentagem destes veículos na rede [27].

Os veículos conectados e autónomos são considerados, assim, a tecnologia do futuro. A Figura 10 representa a potencial evolução da implementação dos VA nas próximas décadas [22] [28].

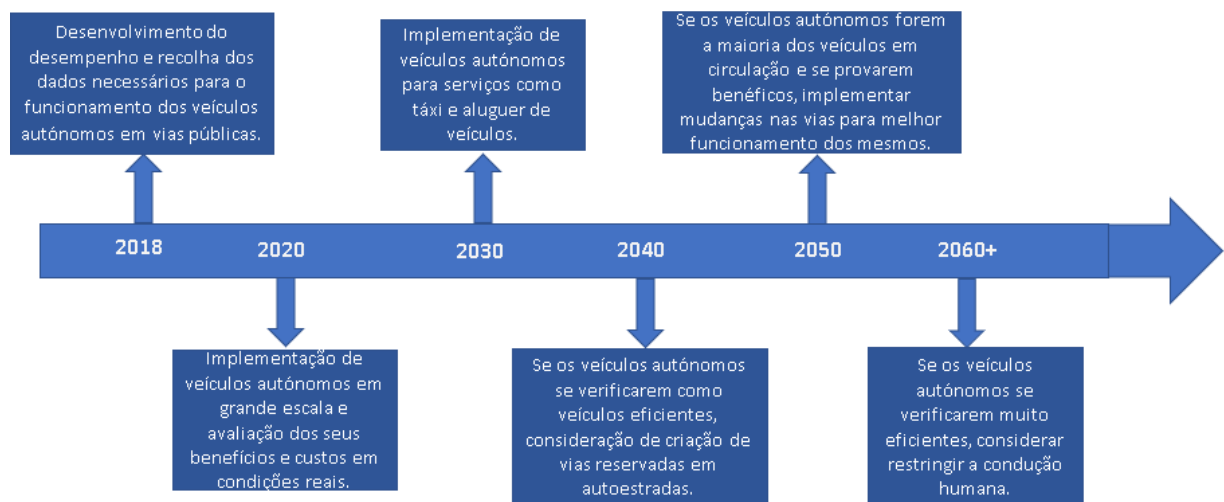


Figura 10: Potencial evolução dos VA para as próximas décadas (adaptado) [28].

A experiência adquirida com a implementação de outras tecnologias automóveis ajuda a prever a evolução da implementação dos VA, sendo que esta irá provavelmente demorar várias décadas [28]. A previsão da evolução de venda de VA permite analisar a dificuldade da implementação dos mesmos, sendo que em 2040 é esperado que entre 40 a 60% das vendas de veículos, sejam relativas a veículos autónomos, tal como apresentado na Tabela 1 [28].

Tabela 1: Previsão das percentagens de venda de VA [28].

Fase	Década	Vendas de Veículos (%)
Disponíveis a custo elevado	2020-2029	2-5
Disponíveis a custo moderado	2030-2039	20-40
Disponíveis a baixo custo	2040-2049	40-60

1.4. Objetivos

Esta Dissertação de Mestrado tem como principal objetivo incluir novos critérios de definição na escolha de rotas de atravessamento para VA numa rede urbana pertencente a uma área metropolitana usando ferramentas de modelação de tráfego e emissões. Assim os objetivos específicos da tese são:

- Caracterizar uma rede urbana relativa à cidade do Porto de forma a identificar e avaliar zonas potenciais onde a mobilidade autónoma possa ser implementada;
- Comparar cenários de futura penetração de VA face à situação atual de veículos convencionais ao nível da velocidade média, atraso relativo, emissões de dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), óxidos de azoto (NO_x) e hidrocarbonetos (HC).

Para tal, este trabalho centrou-se na utilização de modelos microscópicos do tráfego rodoviário e de metodologia de emissões (VISSIM e “Vehicle Specific Power” - VSP, respetivamente) para a criação e estudo dos diferentes cenários.

O trabalho desta Dissertação de Mestrado insere-se no âmbito do projeto P2020 em curso “MobiWise: from mobile sensing to mobility advising”.

Este projeto tem o objetivo de construir uma plataforma 5G que engloba no seu funcionamento sensores, pessoas e veículos de forma a melhorar a mobilidade em cidades. O projeto irá conectar qualquer sensor, pessoa ou veículo, e irá usar toda a informação possível para melhorar a mobilidade do utilizador, através de uma rede complexa e de serviços de plataforma para a implementação de uma internet das coisas numa cidade inteligente.

1.5. Estrutura da Dissertação

A estrutura desta Dissertação de Mestrado divide-se em 5 capítulos. No capítulo 1 é feita uma caracterização dos impactos do setor dos transportes, de medidas para uma melhor eficiência do sistema de transportes, da utilização de ITS e o enquadramento na mobilidade autónoma e conectada. Finalmente, são descritos os objetivos desta tese, bem como a sua estrutura.

No capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica sobre estudos relativos a critérios de escolha de rotas e utilização de ferramentas de simulação para avaliação dos impactos dos VA.

O capítulo 3 foca-se na metodologia, nomeadamente a descrição do estudo de caso, da monitorização e tratamento dos dados de tráfego, dos modelos de tráfego, da metodologia de emissões, do processo de calibração e validação e ainda a descrição dos cenários operacionais.

No capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos durante a realização desta Dissertação.

O capítulo 5 apresenta as conclusões e sugestões para possíveis desenvolvimentos de trabalhos futuros relacionados com o tema.

2. Revisão Bibliográfica

O presente capítulo desta dissertação foca-se nos métodos utilizados em modelos de tráfego que permitam a escolha de rotas de acordo com as diferentes expectativas dos utilizadores da rede, nomeadamente a redução dos consumos e emissões de poluentes. Para além do estudo dos critérios de escolha de rota, procura-se enquadrar os mesmos com Sistemas Inteligentes de Transportes (ITS), ou seja, sistemas de armazenamento de dados e gestão da informação do tráfego. Serão também apresentados estudos acerca da implementação da mobilidade autónoma e conectada e o seu impacto ao nível dos diferentes critérios de escolha de rota.

Na pesquisa bibliográfica apresentada, os autores recorrem principalmente a métodos empíricos e/ou a métodos que utilizam ferramentas de modelação do tráfego e metodologia para estimativa das emissões.

Para poder efetuar um estudo das diferentes rotas, é necessária a identificação das preferências dos condutores e utilizadores da rede viária. Para isso, é necessário recorrer ou a questionários/inquéritos ou a dispositivos recetores de posição (GPS – Sistema de Posicionamento Global ou GNSS – Sistema de Navegação Global por Satélite) para analisar as rotas mais utilizadas.

No caso dos questionários/inquéritos, estes apresentam vários inconvenientes, nomeadamente: a) os intervenientes em questionários/inquéritos tendem a ser otimistas nas suas respostas; b) algumas respostas vão ao encontro do que o entrevistador pretende; c) a resposta por vezes é a menos adequada; d) as respostas dos intervenientes são por vezes afetadas também pelo seu desinteresse ou pressa. Para além dos inconvenientes supracitados, existe um problema relacionado com o facto de nem sempre ser possível a partir de questionários/inquéritos obter resposta para todas as variáveis pretendidas [29].

A utilização de questionários para aferir as preferências dos utilizadores em termos da escolha de rotas tem sido feita por vários autores [29] [30] [31] [32] [33].

O estudo dos critérios que influenciam as escolhas dos condutores entre a sua origem e destino tem ganhado cada vez mais interesse [33]. A escolha de rota torna-se um processo complexo [33]. Alguns critérios quantitativos neste processo são o tempo de viagem, distância, consumo de combustível e emissões, enquanto que a segurança, conforto e o conhecimento da rota são alguns critérios qualitativos [33].

Os utilizadores da rede rodoviária procuram escolher uma rota com o menor custo associado ao parâmetro que se adequa melhor às suas preferências. Esta escolha é feita geralmente a partir de informações disponibilizadas em tempo real de sistemas de navegação ou através da experiência adquirida [30].

A escolha de rotas não pode ser apenas entendida como um processo que acontece unicamente antes do condutor iniciar a sua viagem, mas sim durante a mesma pois existem diversos fatores que podem influenciar a escolha ou mudança de rota pelo condutor, tais como o aparecimento de congestionamentos e a tentativa de encontrar uma rota mais rápida ou curta [32]. O tempo de viagem é um dos principais fatores que os condutores têm em conta aquando do seu processo de escolha de rota. No entanto, existem outros fatores tais como a segurança, consumo de combustível e estado da infraestrutura rodoviária. Para além disso, a escolha de rota é afetada pela experiência do condutor, pelo conhecimento que este tem da rede, isto é, com o tempo o

condutor aprende a tomar decisões, a adaptar-se e escolher a sua rota de acordo com o que estiver a ocorrer na rede [30] [32].

A escolha do modo de transporte também influencia a escolha de rota uma vez que, o condutor de um veículo ligeiro de passageiros não poderá percorrer todos os percursos que uma bicicleta consegue e vice-versa. Adicionalmente, os critérios de escolha são diferentes [31].

Mitsakis et al. estudaram a importância do tempo de viagem e dos consumos de combustível nos critérios de escolha de rota recorrendo a modelos matemáticos de atribuição de tráfego. O modelo incorporou tanto critérios quantitativos (tempo de viagem, distância, consumo de combustível e emissões) como qualitativos (segurança, conforto e o conhecimento da rota) [33]. Concluiu-se que os viajantes quando veem o consumo de combustível como o parâmetro mais importante, tendem a escolher rotas mais curtas e circulam a velocidades baixas. Nas situações nas quais o tempo de viagem é o principal critério, os condutores tendem a escolher vias de maior capacidade de tráfego e que permitem circular a velocidades mais elevadas [33].

Hunt e Abraham investigaram a natureza dos diferentes motivos para a utilização da bicicleta em Edmonton (Canadá) com a finalidade de obter dados acerca de comportamentos de viagem. Assim realizaram-se 1128 questionários a ciclistas, onde eram apresentadas um par de possibilidades de uso da bicicleta e questionados qual seria preferencial [29].

Alizadeh et al. usaram processos matemáticos e de recolha de dados através de inquéritos a fim de caracterizar o tipo de condutores com base nos diferentes critérios de escolha de rota [34].

Neste estudo foram realizados inquéritos, destinados a residentes na área de Montreal (Canadá), onde os participantes foram divididos por quatro categorias diferentes: 1) indivíduos que escolhem apenas uma rota; 2) indivíduos que escolhem duas rotas e sendo uma delas dominante (escolhida 80% das vezes); 3) indivíduos que escolhem duas rotas frequentemente consideradas; 4) indivíduos que escolhem três ou mais rotas [34]. Este estudo, permitiu verificar que as criações de diferentes comportamentos de condução conseguem melhorar a precisão dos modelos utilizados para simular casos de estudo de tráfego [34].

Holden et al. desenvolveram um modelo de previsão de consumo de energia baseado numa recolha de dados realizada por um sistema de navegação por satélite (GNSS) de aproximadamente 1 milhão de milhas de deslocações em mundo real [35]. Para além disso, foi tido em conta perfis de condução e de viagem para uma estimativa dos gastos de energia [35]. O modelo foi calibrado com dados retirados a partir de um sistema GPS fornecidos pela “*Transportation Secure Data Center*” (TSDC) e validado com os dados recolhidos do consumo de combustível de viagens em mundo real, na cidade de Phoenix no Arizona [35]. O modelo apresentou um erro relativo de 9,1% para um veículo convencional e mostrou-se eficaz em estratégias de controlo de ferramentas de escolha de rota [35].

Lou et al. desenvolveram um modelo do processo de evolução do risco em escolha de rotas alternativas [36]. Para além disso, foram aplicados Sistemas Inteligentes de Transportes que permitiram a previsão do tráfego [36].

A incerteza no tempo de viagem, que pode ser causada por degradações estocásticas da capacidade da via, é um elemento adverso que existe na rede de tráfego que reduz a segurança que os utilizadores têm no tempo de viagem e por conseguinte aumenta o risco de uma viagem ser mais demorada [36]. Adicionalmente, as informações do estado do tráfego são consideradas um

fator importante e que influencia as escolhas de rotas pelos condutores. A utilização de Sistemas Avançados de Assistência ao Conductor (ADAS) têm a capacidade de melhorar o acesso dos condutores a informação acerca do estado do tráfego em tempo real, e assim permite aos mesmos ajustar a sua rota em diferentes etapas do trajeto de forma a evitarem congestionamentos inesperados na via [36].

O estudo mostrou que os condutores inibidos da utilização do ADAS, apresentam comportamentos de previsão de riscos na escolha de rotas que podem criar grandes flutuações no fluxo da rede [36].

Wang e Rakha testaram as vantagens inerentes ao acesso à informação do estado das rotas [37]. Para este estudo houve uma recolha de dados baseada em 20 participantes (10 membros do sexo masculino e 10 do sexo feminino; 10 com idade compreendida entre os 18 e os 33 anos e os restantes entre os 55 e os 75 anos) e com o teste a decorrer numa hora de ponta de um dia de semana tipicamente útil, com o teste a abranger 3 componentes (questionário antes e depois do teste e o teste propriamente dito, ou seja, circulação na via) [37].

Neste estudo assumiu-se que 70% da escolha de rota pode ser explicada pelo seu tempo de viagem. Observou-se ainda que o conhecimento do estado da rota levou a uma escolha lógica, especialmente em condutores menos familiarizados com a rede local [37]. Por outro lado, o acesso a esta informação leva os condutores a arriscarem a rota que têm planeada por outra tendo em conta o seu critério de escolha [37]. A informação acerca do tempo de viagem pode não apresentar vantagens para condutores idosos ou para quem não as tenha como primeira consideração [37]. Como é de prever, informação não fidedigna pode levar a efeitos negativos nas escolhas dos condutores [37].

O congestionamento das vias é um fenómeno associado às horas de ponta quando o fluxo de tráfego excede a capacidade de uma via de uma rede de receber mais veículos [38]. Este indica a sobreutilização das vias, conduzindo ao aumento do custo de operação dos veículos, do tempo de viagem, dos níveis poluição e do stress [38]. Nesse contexto, a criação de portagens urbanas foi uma das soluções para consciencializar os condutores dos custos causados pelo congestionamento das vias e concomitantemente possam ter em conta esses fatores na escolha de rota [39].

A avaliação do impacto das portagens urbanas no critério de escolha e no comportamento de escolha de rota foi feita em Nova Deli [40]. O estudo de caso caracteriza-se pelo elevado congestionamento diário [40]. Para este estudo, foram recolhidas 7098 respostas individuais a inquéritos de forma a averiguar o comportamento de viagem dos condutores [40]. Analisando os seus resultados, verifica-se que as portagens urbanas são muito úteis e de extrema importância, diminuindo significativamente os congestionamentos das vias [40].

Bandeira et al. estudaram igualmente os impactos de critérios ambientais de escolha de rota na rede de Aveiro através da análise de 4 rotas definidas com ajuda de uma matriz OD. Para tal, foram utilizadas funções de comportamento com base nos dados de uma rede simulada em VISSIM, e posteriormente aplicadas estas funções nos veículos definidos no modelo. Foram definidos 4 cenários, sendo estes a combinação de 2 níveis de relação de débito e capacidade (v/c) de 50% e 80% com 2 níveis de procura de volumes tráfego destes veículos (750 e 1500 veículos por hora - vph) [41]. Verificou-se que o cenário que apresentava menores emissões foi para um v/c de 50% com 1500 vph. Para o cenário de maior aceitação dos veículos definidos e saturação da rede

de 50%, observaram-se reduções nos tempos de viagem e nas emissões de 6,5% e 9%, respetivamente [41].

Bandeira et al utilizaram ferramentas de modelação para avaliar o impacto de diferentes critérios de escolha de rota tais como a emissão de poluentes, a poluição sonora e a segurança. O estudo foi realizado numa rede rodoviária (Aveiro) com 4 rotas geridas através de uma matriz OD. Neste caso foi utilizado o modelo microscópico de tráfego VISSIM, o *“Surrogate Safety Assessment Model”* (SSAM) para quantificar o número de conflitos [42]. Verificou-se a existência de vários compromissos (*“trade-off”*) entre critérios de escolha [42]. Por exemplo, a rota com menores emissões de poluentes era também a rota onde existia maior contacto com peões. Por outro lado, a rota onde se verificou menor ruído apresentou um fluxo de peões 9 vezes superior ao da rota com maior ruído [42].

Cui e Levinson analisaram o custo das emissões com a finalidade de explorar rotas verdes (rotas com menores emissões) e rotas saudáveis (rotas com menores custos de emissões) na rede rodoviária das Twin Cities (Minneapolis-Saint Paul no estado do Mississipi). A análise incluiu tanto poluentes locais com impacto na qualidade do ar e saúde (NO_x , partículas em suspensão - PM e dióxido de enxofre - SO_2), como de poluentes globais (CO_2) [43]. A estimativa das emissões e concentração dos poluentes foram feitas usando o modelo MOVES (do acrónimo inglês *The Motor Vehicle Emission Simulator*) e a ferramenta de modelação de dispersão R-Line (do acrónimo inglês *“Research LINE – source dispersion model for near-surface releases”*). Os resultados auferidos neste estudo evidenciaram maiores concentrações nas autoestradas devido aos elevados volumes de tráfego, tendo-se verificado os seguintes valores médios para a concentração dos seguintes poluentes nas autoestradas: Partículas em Suspensão (PM) – $3,064 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Dióxido de Enxofre (SO_2) – $1,059 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e Óxidos de Azoto (NO_x) – $67,500 \mu\text{g}/\text{m}^3$, em vias urbanas se verificou que as concentrações eram: PM – $1,916 \mu\text{g}/\text{m}^3$, SO_2 – $0,743 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e NO_x – $27,197 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e em vias rurais eram: PM – $1,178 \mu\text{g}/\text{m}^3$, SO_2 – $0,455 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e NO_x – $17,231 \mu\text{g}/\text{m}^3$. No entanto, as autoestradas expõem os seus utilizadores a menos poluição, visto que o seu tempo de exposição é menor [43].

O desenvolvimento da tecnologia para a mobilidade autónoma tem tido foco na análise aos parâmetros mais importantes na escolha de rota [44]. O estudo feito por Wong et al. [44] analisou o valor do tempo, isto é, a compensação monetária entre o custo de viagem e o tempo de viagem [45].

Com recurso a questionários acerca da escolha de rota e com ajuda de um simulador de condução, Wong et al. compararam o valor do tempo de viagem para os condutores [44]. Os resultados mostram que VA apresentam um valor do tempo 53% inferior face aos veículos convencionais, sendo que as reduções foram mais significativas para condutores com salários superiores [44]. Verificou-se que os utilizadores do simulador de veículos autónomos, tendencialmente optam por continuar atentos à via rodoviária [44]. Concluiu-se nos questionários após utilização do simulador que alguns condutores ganharam confiança na tecnologia dos VA, visto que 16% dos utilizadores que responderam nos questionários iniciais que durante a sua viagem estariam atentos à via, alteraram posteriormente a sua opção para a realização de uma tarefa como dormir, trabalhar ou conceder a sua atenção a ficheiros de multimédia [44].

Como foi referido anteriormente, os modelos microscópicos de tráfego pautam-se pela flexibilidade na análise dos impactos energéticos, ambientais e desempenho do tráfego para

diferentes tipologias de veículos. Face a isso, tem havido mais autores a investigarem os impactos da mobilidade autónoma usando estes modelos [22].

Ellion Huang et al. utilizaram a ferramenta de modelação microscópica de tráfego, VISSIM, para simular o impacto de diferentes cenários com VA na rede de San Diego na Califórnia. O seu objetivo era estudar o impacto da penetração de VA na rede ao nível do atraso relativo e a velocidade média dos veículos. Conclui-se que a penetração de VA permitiu a redução do atraso relativo dos veículos na rede, e o aumento da sua velocidade média [22].

Liu et al. estudaram a aplicação de VA numa intersecção com o objetivo de estabelecer um novo mecanismo sem utilização de semáforos e de acordo com os seguintes critérios: a) evitar a colisão de veículos na mesma via e entre veículos em vias distintas durante o atravessamento na intersecção; b) diminuição do atraso relativo médio; c) o processo de decisão de escolha de rota deve ser local de modo a diminuir o custo computacional associado; d) a heterogeneidade dos veículos deve ser considerada. Para tal, foram realizadas simulações em Matlab e na ferramenta de modelação de tráfego SUMO (*"Simulation of Urban Mobility"*). Os resultados demonstraram que o conhecimento em tempo real da posição dos veículos na intersecção reduziu o tempo de atravessamento em mais de 60 segundos (e, portanto, diminuição do atraso relativo médio) e aumentou a capacidade da intersecção em mais de 20% [46].

Igliński et al. usaram estudos empíricos para demonstrar que uma eco-condução permitiria reduções no consumo de combustível de 10% a 20% através da tecnologia de VA, uma vez que estes asseguram essa redução pois garantem a utilização de uma eco-condução, ao contrário de um condutor humano que nem sempre aplica estes princípios [47]. Uma estimativa das emissões de GEE é bastante complicada, no entanto pode-se esperar uma redução entre os 40% e os 60%, sendo que a maior redução será atingida quando os veículos autónomos se tornarem populares e atingirem o 5º nível de automação [47]. A implementação dos veículos autónomos ao nível de mercado mundial acarreta a solução de várias variáveis, entre elas a criação de novas regras de trânsito, da indecisão do culpado em possíveis acidentes (a marca construtora, o programador do software ou o dono do veículo) para a criação do seguro do veículo, a possibilidade de hackers entrarem no software do veículo ou de haver falhas no mesmo, e como as construtoras destes veículos tentarão que os seus clientes possam viajar cada vez mais e não sendo mais o tempo desperdiçado, tornando a condução menos cansativa e stressante, as pessoas poderão ter uma tendência superior a mudar a sua residência para os subúrbios [47].

A análise da revisão bibliográfica supracitada mostra uma utilização extensa de critérios ambientais e energéticos na seleção de rotas, e com aplicações a diferentes escalas geográficas. Para além disso, a aplicação de ferramentas de modelação de tráfego e emissões é bastante flexível na avaliação desses mesmos critérios. Finalmente, a avaliação dos critérios de escolha de rota no contexto de novas formas de mobilidade como a autónoma tem tido interesse crescente por parte da comunidade científica.

No entanto, a avaliação dos impactos da futura penetração de VA ao nível das emissões de poluentes globais e locais é diminuta. Por conseguinte, esta Dissertação de Mestrado revela-se como inovadora uma vez que avalia futuros cenários de mobilidade numa perspetiva ambiental e energética numa rede viária inserida numa área metropolitana onde se verificam problemas de congestionamento em vários períodos do dia. A utilização de ferramentas microscópicas de tráfego e emissões permitem uma avaliação mais precisa dos critérios uma vez que têm em consideração

o comportamento de cada veículo (convencional e autónomo) e as suas variações de velocidade e aceleração com alta resolução temporal.

3. Metodologia

O estudo de caso diz respeito às vias mais relevantes do concelho do Porto no interior na Via de Cintura Interna (VCI). O trabalho realizado nesta Dissertação de Mestrado foi elaborado seguindo uma metodologia, descrita no fluxograma apresentado na Figura 11.

Inicialmente foi realizada a recolha dos dados para a realização do estudo de caso. De seguida, estando completa a codificação da rede viária, foi feita a calibração e validação do modelo de tráfego durante o período de maior procura de tráfego (cenário base). A modelação de tráfego e emissões foi feita usando o modelo VISSIM e a metodologia do VSP, respetivamente. Posteriormente, foram implementados os cenários alternativos e analisadas as emissões e parâmetros do desempenho do tráfego.

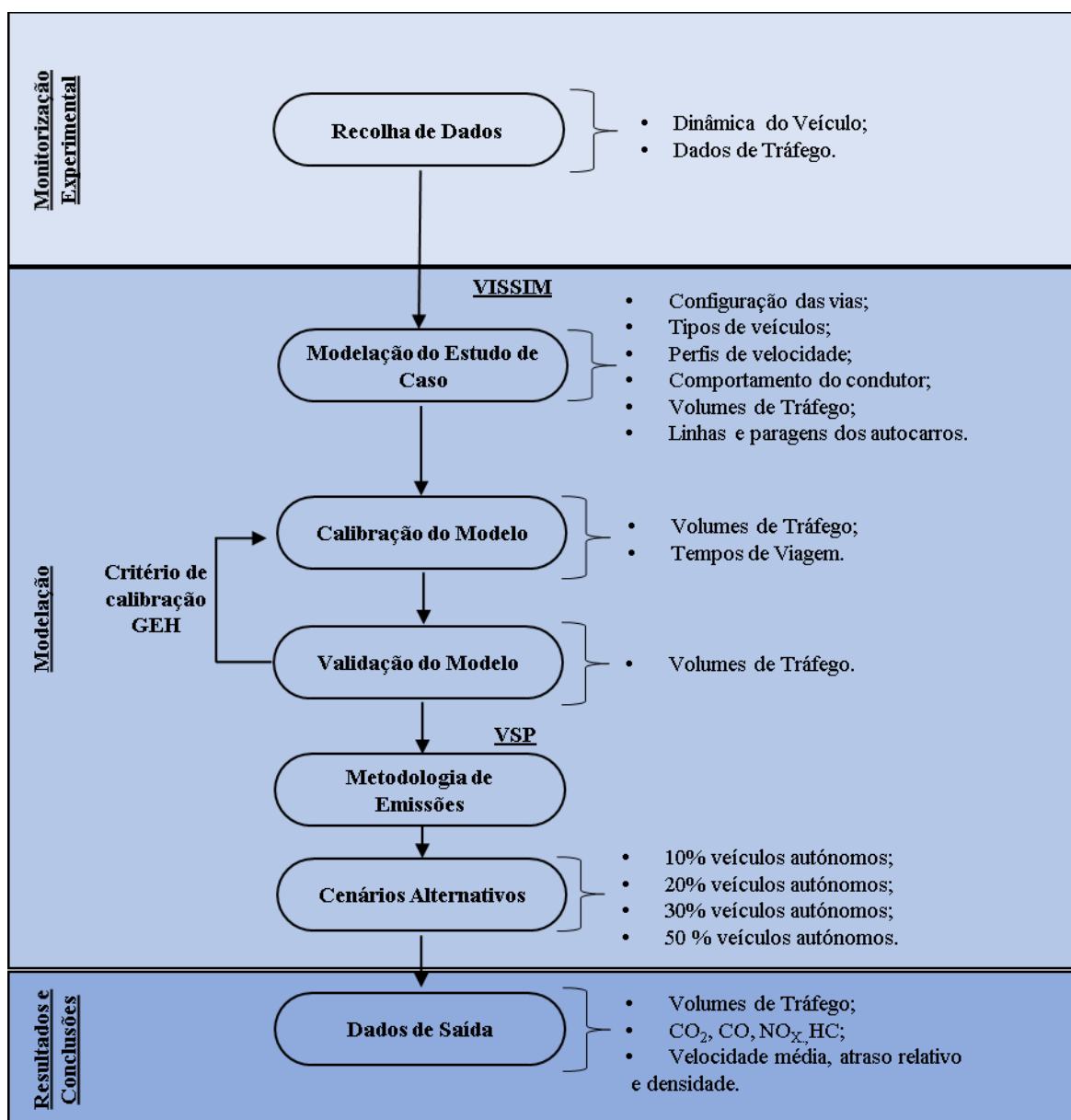


Figura 11: Fluxograma com a metodologia aplicada na realização deste trabalho de Dissertação.

Esta Dissertação de Mestrado divide-se em 5 tarefas que foram distribuídas tal como é apresentado na Tabela 2:

Tabela 2: Calendarização das tarefas a realizar ao longo do semestre, para a realização da Dissertação de Mestrado.

2018									
Tarefa	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro
1									
2									
3									
4									
5									

Tarefa 1 – Revisão bibliográfica

Literatura técnica sobre a aplicação de modelos ao nível da escolha de rota e a sua interligação com ferramentas de modelação de tráfego e emissões e ainda avaliação da tecnologia VA ao nível dos consumos e emissões.

Tarefa 2 – Modelação de tráfego, consumos e emissões de poluentes

Através do modelo microscópico de tráfego VISSIM e ferramentas de cálculo de emissões baseadas na Potência Específica do Veículo, foi caracterizada a rede rodoviária atual do estudo de caso escolhido.

Tarefa 3 – Obtenção e tratamento dos dados experimentais

Foi feita a recolha de dados do tráfego do domínio de estudo e ainda, a monitorização experimental da dinâmica ao longo do domínio de estudo de forma a calibrar e validar os modelos escolhidos na Tarefa 2.

Tarefa 4 – Definição e análise de cenários

Nesta tarefa, foram testados diferentes cenários relativos a futuras taxas de penetração de VA e avaliação dos seus impactos ao nível das emissões e desempenho do tráfego. Para além disso, foram identificados os pontos críticos da rede viária.

Tarefa 5 – Escrita da Dissertação de Mestrado

Escrita da Dissertação de Mestrado.

3.1. Modelação de tráfego

A utilização de ferramentas de simulação microscópica são amplamente usadas em estudos de tráfego devido à sua capacidade em simular a rede viária com elevado detalhe geométrico, análise de cada entidade (veículo), diferenças ao nível do comportamento dos condutores e das suas escolhas de rotas [48]. Contudo, a modelação microscópica depende da qualidade e da disponibilidade de dados do domínio de estudo de forma a obter uma análise mais fidedigna possível.

Para a modelação do caso de estudo e escolha das rotas, foi escolhido o modelo microscópico de tráfego VISSIM 10 [49].

O PTV VISSIM é um software microscópico multimodal de simulação do fluxo de tráfego desenvolvido pela PTV Planung Transport Verkehr AG em Karlsruhe, na Alemanha. O nome deriva de "Verkehr In Städten – SIMulationsmodell" (alemão para "Tráfego em cidades – modelo de simulação") [49].

O pacote de simulação é composto internamente por duas partes distintas, o simulador de tráfego e o gerador de sinal. Na primeira são geradas a visualização em tempo real das operações de tráfego e os dados de saída, tais como os tempos de viagem, velocidade, aceleração, comprimentos de filas, número de pára-arrancas, entre outros. O gerador do sinal é um software de controlo das informações que resultam do simulador de tráfego, através de um detetor de classificação que se baseia em passos de tempo discretos até 0,1 segundos [49].

O VISSIM é vantajoso pois permite obter dados das trajetórias dos veículos que permitem estimar as emissões dos veículos com elevada precisão temporal [50].

A simulação microscópica, por vezes denominada microssimulação, significa que cada entidade (veículos motorizados, bicicletas e peões) é simulada individualmente, isto é, o modelador define as suas características comportamentais e ao nível da dinâmica o mesmo acontece com as interações entre estas entidades [49].

A utilização do VISSIM em estudos de tráfego é extensa e com variedade de aplicações tais como:

- Estudos prévios relacionados com o ordenamento do território;
- Estudos de impacto ambiental;
- Sistemas de controlo de tráfego em horas de maior fluxo;
- Planeamento e modelação dos peões em qualquer tipo de ambiente;
- Estudos de viabilidade para a implementação de um dado modo de transporte numa cidade [51] [49] [52].

O VISSIM foi assim escolhido na realização desta Dissertação de Mestrado por permitir: 1) a modelação do comportamento do condutor em diferentes tipos de vias (urbana, rural e autoestrada); 2) ter em consideração parâmetros relativos aos comportamentos do condutor na via e em intersecções tais como o seu comportamento perante sinais luminosos, rotundas e acessos a autoestradas; 3) a incorporação de parâmetros que permitem a simulação da mobilidade

autônoma e a sua interação com a mobilidade convencional; 4) a exportação dos dados de trajetória para diferentes tipos de veículos com a resolução temporal pretendida, o que torna esta ferramenta compatível com metodologias externas para o cálculo de emissões; 5) permitir a identificação de pontos críticos da rede de acordo com um dado critério ambiental, capacidade e do desempenho da rede [49].

3.1.1. Comportamento do condutor

O modelo microscópico do VISSIM é estocástico e baseado em intervalos de tempo e que considera os condutores-veículos como entidades básicas [49]. O VISSIM, à semelhança de outras ferramentas de microsimulação, incorpora submodelos de comportamento do condutor: 1) quando os condutores seguem outros veículos (*"car following"*); 2) quando mudam de via (*"lane changing"*); 3) o movimento lateral; 4) aproximação e paragem ao sinal vermelho do semáforo; e 5) quando os condutores entram numa corrente prioritária de uma interseção (*"gap-acceptance"*) [39]. Os modelos anteriores podem ser ajustados de acordo com o tipo de via e veículo de acordo com as especificidades do domínio de estudo [52].

O modelo desenvolvido para o comportamento psicofísico do condutor aplicado no VISSIM é baseado no trabalho de Wiedemann (1974 e 1991). O conceito básico do mesmo consiste numa tomada de decisão do condutor de um veículo mais rápido que inicia a desaceleração. Como este atingiu o limite de percepção face ao veículo mais lento, e não tem conhecimento da velocidade do mesmo, diminui a sua velocidade. Quando a sua velocidade for inferior à do veículo lento, volta a acelerar novamente até ao limite de percepção [49].

3.1.2. Escolha de rotas

A ferramenta de modelação VISSIM dispõe de dois métodos para a escolha de rotas [49]. O primeiro consiste na definição estática na qual os veículos são inseridos nas entradas da rede a partir dos centroides, e para cada interseção é definida uma percentagem de viragem do tráfego num intervalo de tempo para um determinado modo de transporte [49]. No segundo método a atribuição do tráfego é dinâmica usando o módulo *"Dynamic Assignment"*. Neste caso, o modelador define matrizes OD com o número de viagens entre as mesmas num dado intervalo de tempo [49].

Um aspeto importante no VISSIM é que o processo de atribuição dinâmica é iterativo, ou seja, são necessárias várias repetições para se atingir o equilíbrio da rede. Assim, o VISSIM possui algoritmos internos que determinam não só as melhores rotas (de acordo com um critério definido para um tipo de veículo), mas também de um conjunto de rotas menos favoráveis [52].

Por cada rota, é realizada uma análise com base no critério de escolha dos condutores e que é representado através de um custo geral que se baseia no tempo, distância e outros custos inerentes a um dado segmento (portagens, aproximação a uma escola, obras, entre outros). A distância e o custo são definidos diretamente na rede enquanto o tempo é calculado durante a simulação.

O segundo método é mais adequado no contexto de atribuição do tráfego uma vez que a distribuição é feita em diferentes passos de tempo e permite redefinir rotas como resultado de congestionamento pontual num dado segmento da via. No entanto, exige o conhecimento da

matriz de viagens e critérios de escolha das mesmas, o que em redes viárias mais extensas se pode tornar inviável [49] [52].

3.2. Metodologia de Emissões

Para estimar as emissões dos gases de escape dos veículos, recorreu-se à metodologia VSP – “Vehicle Specific Power” (Potência Específica do Veículo) [53] [54].

Este conceito foi inicialmente estudado por José Luis Jiménez-Palacios no Instituto de Tecnologia de Massachusetts em 1998 [53] e corresponde à soma das cargas resultantes do coeficiente de arrasto, aceleração ou desaceleração e declive da via, divididas pela massa do veículo [53] [54] [55]. Estes parâmetros representam a potência do motor através da energia cinética, coeficiente de resistência aerodinâmica e da inclinação da via [55].

As vantagens principais de utilizar este modelo como uma variável independente para estudar as emissões de veículos são: 1) a potência específica é diretamente dimensionável, uma vez que considera a estimativa das emissões através de parâmetros de funcionamento do motor tais como a velocidade e a aceleração; 2) o VSP incorpora o efeito da topografia da via nas emissões de poluentes; 3) a potência específica mostrou-se como um parâmetro mais adequado para a estimativa das emissões dos gases de escape do que a velocidade média [56].

Para a realização desta Dissertação de Mestrado, foram consideradas as emissões segundo a segunda de veículos de passageiros a gasolina e gasóleo [57] [58] e comerciais ligeiros a gasóleo [58], e ainda autocarros urbanos a gasóleo [59].

A Expressão 1 apresenta a fórmula para o cálculo do VSP para veículos ligeiros de passageiros e comerciais [54]:

$$VSP = v \times [1,1 \times a + 9,81 \times \sin(\arctg(\text{declive})) + 0,132] + 0,00032 \times v^3 \quad (1)$$

Onde VSP é a potência específica do veículo (kW/ton), v a velocidade instantânea (m.s^{-1}), a a aceleração (m.s^{-2}) e declive, o declive da via expresso em valores decimais. No caso dos autocarros urbanos, a formulação do VSP é expressa através da Expressão 2 [59]:

$$VSP = v \times [a + 9,81 \times \sin(\text{declive}) + 0,092] + 0,00021 \times v^3 \quad (2)$$

Tal como é patente nas expressões anteriores, o VSP é uma função da velocidade instantânea, da aceleração e do declive da via [54]. Os valores de VSP estão divididos em 14 modos para os veículos ligeiros e em 8 para os autocarros [54] (Tabela 3), e por sua vez cada modo tem associado um fator de emissão (em gramas por segundo) de CO_2 , CO, NO_x e HC. Nos veículos ligeiros, os 14 modos estão divididos por 2 modos de desaceleração (1 e 2), 1 modo que representa situações onde o veículo está parado ou circula a uma velocidade muito baixa (3) e combinações

de acelerações positivas e velocidades (4 a 14) [54]. Nos autocarros urbanos, os 8 modos estão divididos por 1 modo de desaceleração (1), 1 modo que representa situações onde o veículo está parado ou circula a uma velocidade muito baixa (2) e combinações de acelerações positivas e velocidades (3 a 8) [59].

Tabela 3: Modos VSP (Nota: Valores de VSP em kW/ton) [57] [58].

Modo VSP	Veículos Ligeiros de Passageiros e Comerciais	Autocarros Urbanos
1	$VSP < -2$	$0 \leq VSP$
2	$-2 \leq VSP < 0$	$0 \leq VSP < 2$
3	$0 \leq VSP < 1$	$2 \leq VSP < 4$
4	$1 \leq VSP < 4$	$4 \leq VSP < 6$
5	$4 \leq VSP < 7$	$6 \leq VSP < 8$
6	$7 \leq VSP < 10$	$8 \leq VSP < 10$
7	$10 \leq VSP < 13$	$10 \leq VSP < 13$
8	$13 \leq VSP < 16$	$VSP \geq 13$
9	$16 \leq VSP < 19$	
10	$19 \leq VSP < 23$	
11	$23 \leq VSP < 28$	
12	$28 \leq VSP < 33$	
13	$33 \leq VSP < 39$	
14	$VSP \geq 39$	

3.3. Estudo de Caso

O estudo de caso usado localiza-se na Área Metropolitana do Porto (AMP), mais especificamente no concelho do Porto onde residiam em 2017, 1719362 e 214353 pessoas, respetivamente [60].

No distrito do Porto, segundo a Associação do Comércio Automóvel de Portugal estavam registados no final do ano 2014, 854445 veículos ligeiros, o que juntando os veículos pesados atinge os 870919 veículos [61]. Tendo-se contabilizado em todo o continente 5519589 veículos, significa que no distrito do Porto o parque automóvel corresponde a 16% do total continental, sendo apenas inferior ao distrito de Lisboa [61].

Segundo dados da TomTom, relativos ao ano de 2016 [62], na cidade do Porto os condutores perdem um tempo de viagem diário extra de 31 minutos e anual de 118 horas no tráfego, sendo 147ª e 2ª no ranking mundial e nacional da TomTom, respetivamente. Refira-se que o tempo perdido no tráfego aumentou 4% entre 2015 e 2016, e segundo a TomTom, o período entre as 18h e 19h apresenta as maiores percentagens de congestionamento [62].

Ao abrigo do projeto C-Roads, a AMP está envolvida na implementação de medidas que preparem as suas vias de modo a tornar os CAV uma realidade. Os estudos piloto deste projeto, envolvem a preparação de vias como a A4 (Autoestrada Transmontana), A20 (Circular Regional Interior do Porto – CRIP, e que integra parte do traçado da VCI), A28 (Autoestrada do Norte Litoral) e N14 (Estrada do Baixo Minho e que integra a Via Norte entre o nó da VCI e a Maia) e a implementação do uso de um autocarro autónomo (CaetanoBus) [63] [64]. Neste projeto, será criado um corredor preparado para veículos CAV entre Porto e Vigo que visa tornar as vias associadas mais seguras e reduzir as emissões de poluentes [64].

Considerando estes valores supramencionados, este domínio de estudo mostra-se como situável para a análise e estudo de novos métodos de escolha de rota com incorporação de ITS, a zona da baixa do Porto (Figura 12).

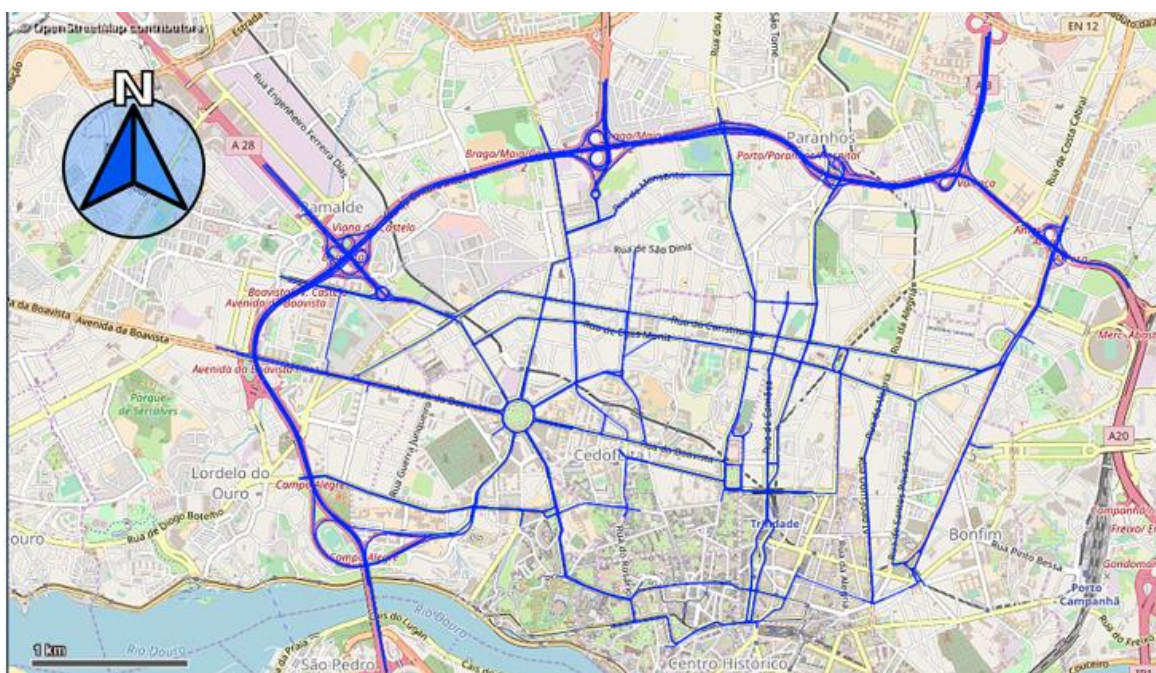


Figura 12: Baixa do Porto e a rede criada (Fonte: OpenStreetMaps).

A rede criada contém as principais vias da baixa do Porto, como a Avenida da Liberdade, Rua da Constituição e a Rua de Egas Moniz, a Avenida Associação Empresarial de Portugal (AEP), a Avenida da Boavista, a Praça Mouzinho de Albuquerque e a Praça do Marquês de Pombal e a Avenida Fernão Magalhães. A VCI corresponde à delimitação da rede.

3.4. Monitorização Experimental

A monitorização experimental consistiu na recolha dos dados de volumes de tráfego e na dinâmica do veículo ao longo da rede.

No início do trabalho de modelação em VISSIM, foi necessário averiguar o número de veículos que circulam na baixa do Porto, mais propriamente em horas de ponta (7h30-11h30 e 16h-20h30). Para isso recorreu-se aos dados recolhidos por espiras localizadas em diferentes pontos da rede, e que foram disponibilizadas pelo Instituto de Telecomunicações -Porto, sendo relativos ao mês de abril de 2016. Os dados de volumes de tráfego estão disponibilizados em intervalos de 5 minutos ao longo de todo o dia, sendo que as mesmas não fazem distinção entre veículos ligeiros e pesados. Após filtragem inicial das espiras, visto nem todas estarem inseridas na rede em estudo, obtiveram-se 27 nós que se encontram apresentados na Tabela 4 e na Figura 13, sendo identificadas pelo número de identificação original.

Tabela 4: Nós da rede e a sua localização.

latitude	longitude	Ponto	Descrição	Sentido
41,15753	-8,62663	4	Avenida da Boavista	Oeste
41,16083	-8,60423	8	Praça do Marquês de Pombal	Norte
41,14585	-8,61464	12	Jardim de João Chagas (Cordoaria)	Este
41,16207	-8,60582	15	Rua da Constituição	Oeste
41,15153	-8,61035	18	Avenida dos Aliados	Sul
41,15957	-8,62548	19	Rua Nossa Senhora de Fátima	Oeste
41,15778	-8,59379	22	Avenida Fernão de Magalhães	Norte
41,16615	-8,64877	23	Avenida do Bessa	Este
41,16247	-8,60672	24	Rua Faria de Guimarães	Norte
41,15387	-8,60468	26	Rua de Santa Catarina	Norte
41,15933	-8,62876	28	Avenida de França	Norte
41,15176	-8,62594	29	Rua Júlio Dinis	Sul
41,16227	-8,60756	33	Rua da Constituição	Oeste
41,15846	-8,63193	45	Avenida da Boavista	Oeste
41,15256	-8,62934	46	Rua de Campo Alegre	Oeste
41,16459	-8,63809	48	Avenida da Associação Empresarial do Porto	Este
41,1622	-8,60929	49	Rua São Brás	Sul
41,1482	-8,6058	57	Rua Formosa	Este
41,16318	-8,61111	62	Rua Antero de Quental	Sul
41,15334	-8,61343	63	Praça República	Norte
41,14695	-8,6111	72	Avenida dos Aliados	Norte
41,1584	-8,63214	73	Avenida da Boavista	Este
41,16147	-8,6114	76	Rua Antero de Quental	Norte
41,14655	-8,60982	79	Rua Sá da Bandeira	Norte
41,1614	-8,60916	89	Rua Damião de Góis	Este
41,14758	-8,62176	96	Rua Dom Manuel II	Oeste
41,15013	-8,61103	103	Avenida dos Aliados	Sul

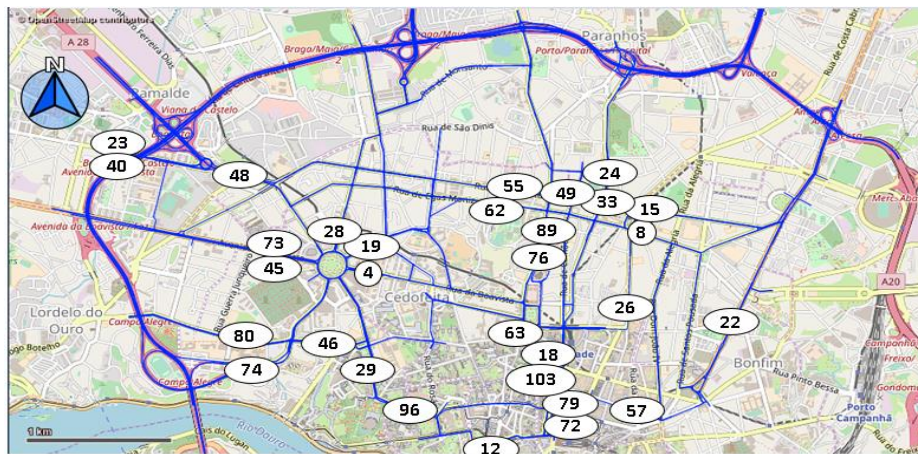


Figura 13: Nós das espiras na rede criada no VISSIM (Fonte: OpenStreetMaps).

Para além dos dados de tráfego supracitados, recorreu-se ao Relatório de Tráfego na Rede Nacional de Autoestradas relativo ao 2º trimestre de 2016 para estimar os volumes de tráfego nas entradas na rede (Figura 14). A Tabela 5 apresenta os valores do Tráfego Médio Diário Mensal (TMDM, relativos ao mês de Abril para estar em concordância com o período dos dados das espiras) para os pontos referidos para assim adaptar os mesmos ao número de veículos a inserir em cada uma destas vias para o período de simulação do modelo [65].

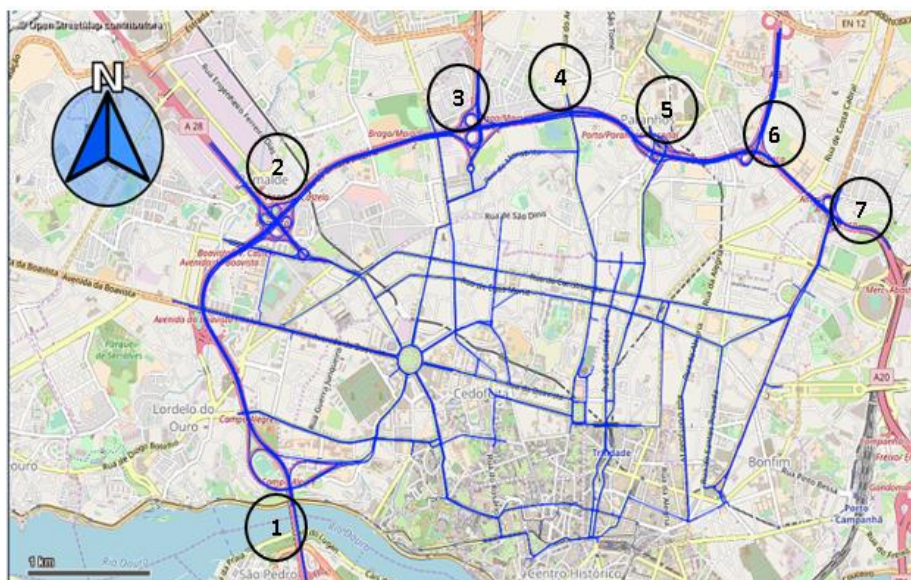


Figura 14: Vias com ligação à VCI e de acesso à rede (Fonte: OpenStreetMaps).

Tabela 5: Volumes de tráfego médio diário mensal nos pontos de acesso à rede pela VCI [65].

Ponto	Zona	Tráfego Médio Diário Mensal
1	Ponte da Arrábida	108772
2	AEP	135437
3	Amial - Regado	147106
4	Amial - Paranhos	147106
5	Paranhos	143110
6	A3	138530
7	Mercado Abastecedor	111889

Para além da necessidade de ter conhecimento dos volumes de tráfego, foi necessária a monitorização da dinâmica do veículo (recolha dos tempos viagem e consumos médios de combustível em diferentes rotas). Para isso, foram realizadas 5 rotas no domínio de estudo usando um veículo ligeiro de passageiros.

As características das rotas, nomeadamente o número de sinais luminosos, distância total (quilómetros – km), densidade de sinais luminosos, entre outros, são apresentadas na Tabela 6.

As rotas são as seguintes:

Rota 1 (Figura 15): Jardins do Palácio de Cristal → Loja do Cidadão (Avenida dos Aliados, Trindade, Faria Guimarães);

Rota 2 (Figura 16): Loja do Cidadão → Palácio de Cristal (pela VCI);

Rota 3 (Figura 17): Crowne Plaza Porto → Praça do Doutor Francisco Sá Carneiro (através da Praça Mouzinho de Albuquerque e da Rua Egas Moniz);

Rota 4 (Figura 18): Praça do Doutor Francisco Sá Carneiro → Direção do Ambiente da Câmara Municipal do Porto (Rua da Constituição);

Rota 5 (Figura 19): Avenida AEP → Crowne Plaza (através da Praça Mouzinho de Albuquerque).

Tabela 6: Características das rotas (Nota: Tempo de viagem esperado retirado do GoogleMaps).

Rota	Características das Rotas			
	Nº Sinais Luminosos	Distância (km)	Densidade de Sinais Luminosos por km	Tempo de Viagem Esperado (minutos)
1	34	5,2	6,5	15
2	8	9,9	0,8	10
3	34	4,9	6,9	15
4	14	3,1	4,5	12
5	18	3,8	4,7	6

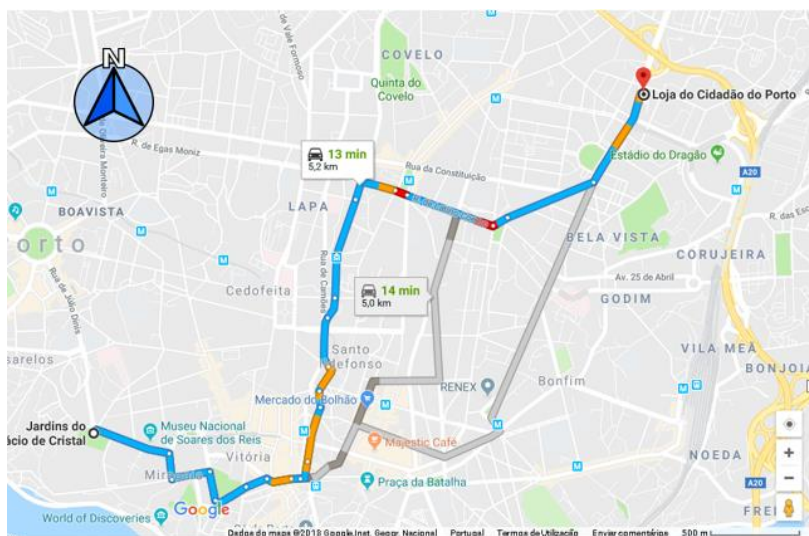


Figura 15: Rota 1, origem nos Jardins do Palácio de Cristal e destino a Loja do Cidadão (Fonte: Google Maps).

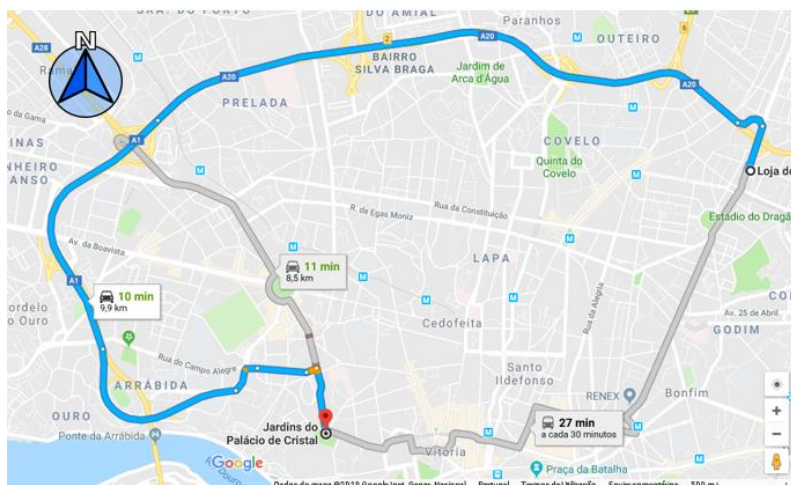


Figura 16: Rota 2, origem na Loja do Cidadão e destino o Palácio de Cristal (Fonte: Google Maps).

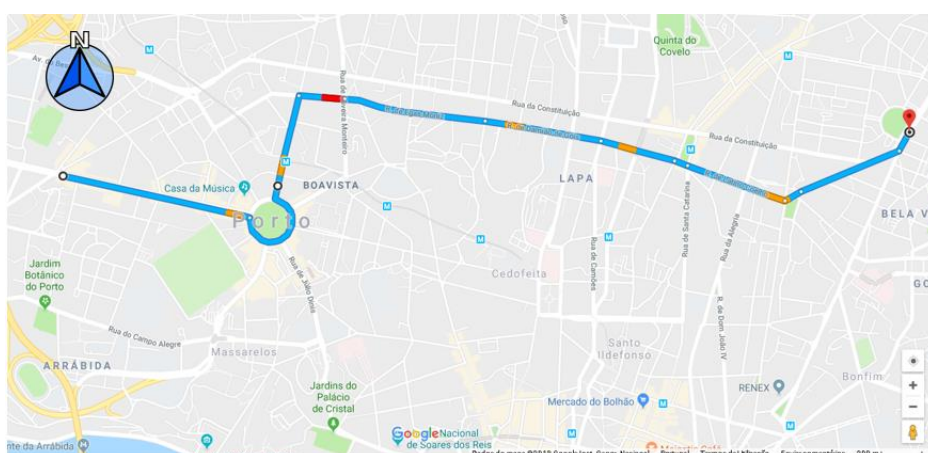


Figura 17: Rota 3, origem no Crowne Plaza e destino a Praça do Doutor Francisco Sá Carneiro (Fonte: Google Maps).

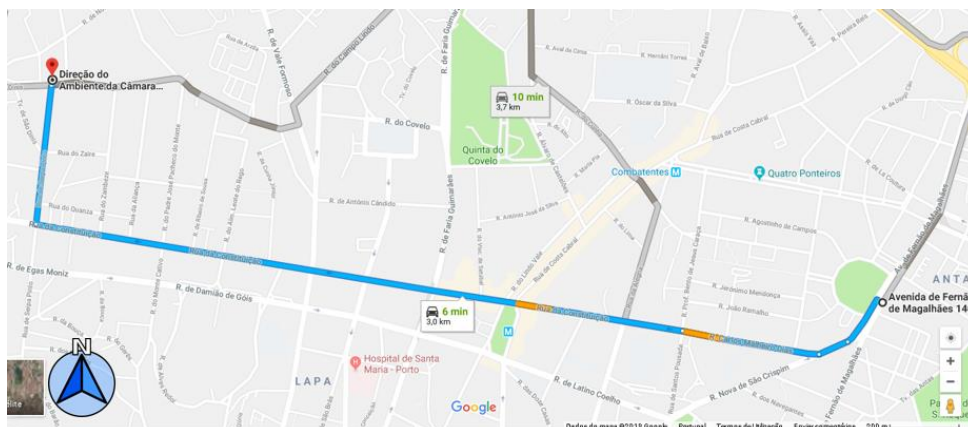


Figura 18: Rota 4, origem na Praça do Doutor Francisco Sá Carneiro e origem a Direção do Ambiente da Câmara municipal do Porto (Fonte: Google Maps).

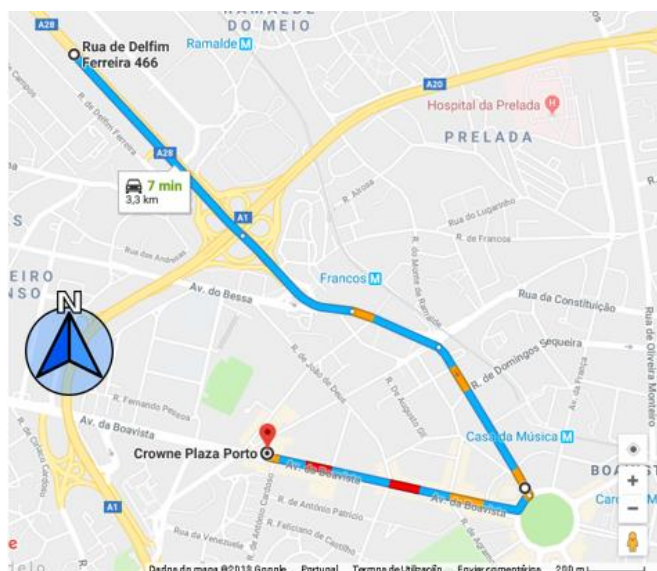


Figura 19: Rota 5, origem na Avenida da Associação Empresarial de Portugal e origem o Crowne Plaza (Fonte: Google Maps).

Com a utilização de um dispositivo GNSS no veículo, foi possível retirar dados de localização (latitude, longitude, altitude e velocidade) segundo a segundo para análise dos perfis de velocidade e taxas de aceleração e desaceleração. A monitorização experimental decorreu com condições meteorológicas pautadas pelo sol e ausência do vento e foram realizadas em Junho de 2018.

Devido ao elevado tráfego e aos constantes congestionamentos sentidos na cidade do Porto, e ao curto espaço de tempo disponível, apenas foi possível fazer 15 repetições das 5 rotas realizadas em 2 dias (tal como é apresentada na Tabela 7). No primeiro dia, realizou-se as medições no período da hora de ponta da manhã e no segundo dia foram realizadas no período da hora de ponta da tarde.

A amostra total contém 15 repetições, 91,6 quilómetros e 3 horas e 57 minutos.

Tabela 7: Tabela da recolha da dinâmica do veículo.

Rota	Repetição	Hora Início	Hora Final	Consumo Combustível (L/100Km)	Dia	Período	Notas
5	1	09:16	09:30	4,7	26/06/2018	Manhã	
3	1	09:37	09:54	5,8	26/06/2018	Manhã	
4	1	09:55	10:03	3,6	26/06/2018	Manhã	
3	2	10:19	10:39	6,3	26/06/2018	Manhã	
2	1	10:40	10:59	3,6	26/06/2018	Manhã	
1	1	10:59	11:15	6,4	26/06/2018	Manhã	
2	2	11:15	11:26	4,6	26/06/2018	Manhã	
4	2	11:51	11:57	4,1	26/06/2018	Manhã	
3	3	12:12	12:31	6,2	26/06/2018	Manhã	
5	2	16:43	16:54	4,6	27/06/2018	Tarde	
3	4	17:21	17:42	6,8	27/06/2018	Tarde	
2	3	17:46	18:22	4,2	27/06/2018	Tarde	Acidente VCI
1	2	18:53	19:13	8,3	27/06/2018	Tarde	
2	4	19:13	19:26	3,3	27/06/2018	Tarde	
1	3	19:26	19:42	6,6	27/06/2018	Tarde	

3.5. Conceção da Rede e Modelação de Tráfego

No presente subcapítulo pretende-se apresentar todos os dados de entrada mais relevantes durante a fase de conceção da rede no modelo de tráfego VISSIM. Estes parâmetros são importantes visto permitirem simular o comportamento dos diversos veículos inseridos na rede criada o mais próximo da realidade possível.

O primeiro passo foi a criação das vias (*Links*) onde circulam os veículos. Para tal, foi utilizada a ferramenta de modelação "*Links*" [49], como se pode observar na Figura 20. Pode-se constatar na mesma figura que como se trata de vias do tipo "Estrada", foi selecionado como o comportamento dos veículos na mesma como sendo desse tipo ("*Behavior Type*" – "1: *Urban (motorized)*") [49]. A rede total modelada foi constituída por 1637 "*Links*", cuja extensão total perfaz 110 km.

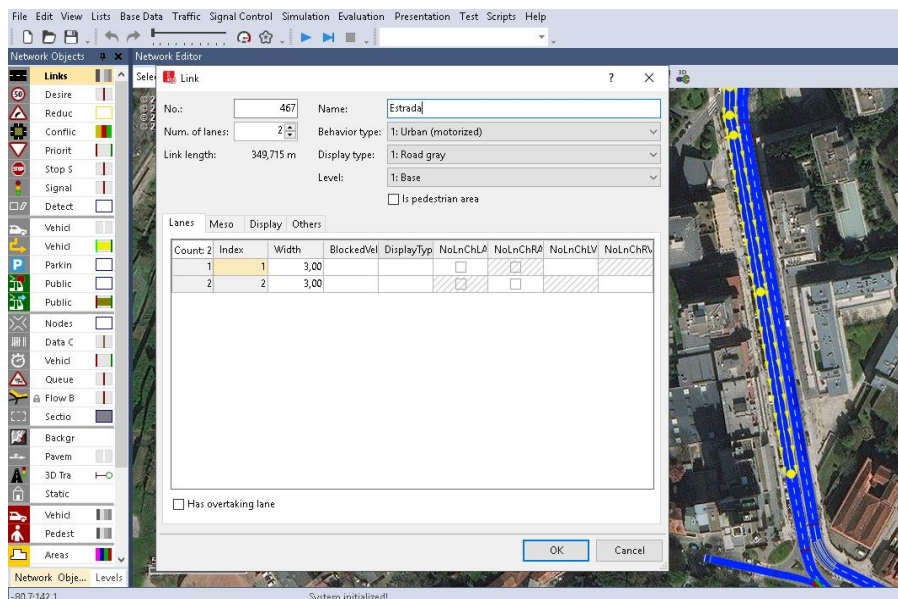


Figura 20: Exemplo das características de um "Link" com um dado tipo de comportamento do condutor.

Após a criação de todos os *Links*, obteve-se a rede pretendida como demonstrado na Figura 21.

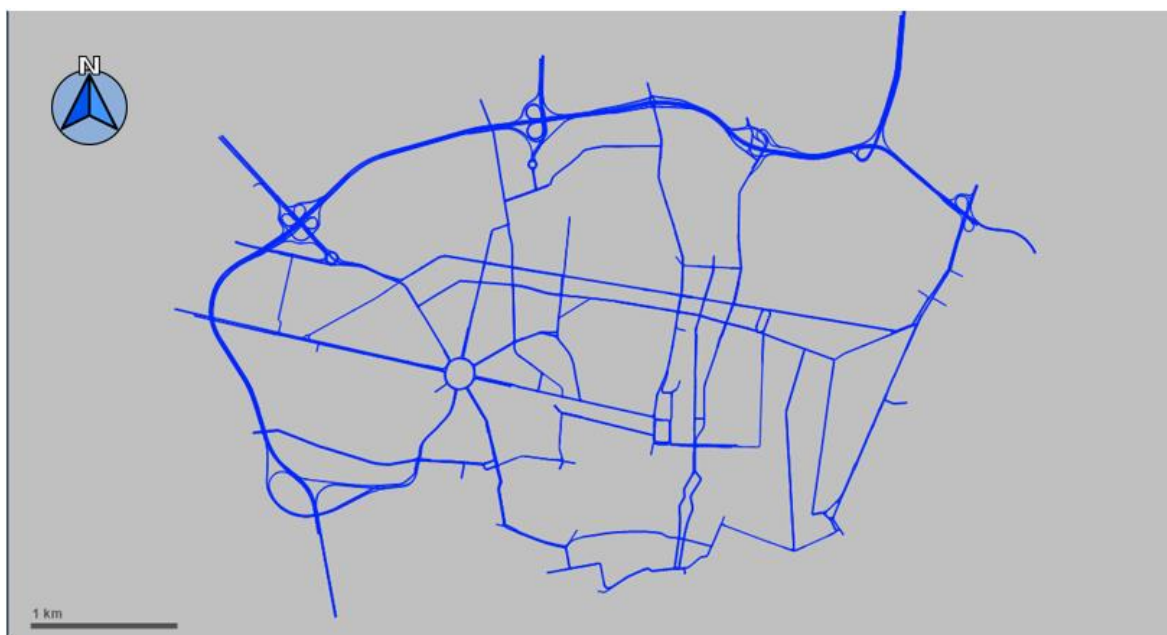


Figura 21: Rede modelada do domínio de estudo no modelo de tráfego VISSIM.

Com a rede criada, é agora necessário a criação dos tipos de veículos que circularão na mesma e os perfis de velocidade que os mesmos vão adotar durante as simulações. Para tal foram definidos os veículos convencionais ligeiros de passageiros e os autocarros urbanos.

Posteriormente, foram então definidos os decisores de velocidade (*Desired Speed Decisions*) [49] de acordo com as velocidades máximas permitidas ao longo dos diferentes segmentos da rede, e associados a cada tipo de veículo em cada “*Link*” (tal como é exemplificado na Figura 22. Tendo sido aplicados estes decisores em 1170 pontos da rede.

Para além disso, implementaram-se zonas de redução de velocidade com a utilização da ferramenta “*Reduced Speed Areas*” [49], onde os veículos reduzem momentaneamente a sua velocidade (como é apresentado na Figura 23, uma das zonas de redução de velocidade numa das entradas da Praça Mouzinho de Albuquerque). Esta tipo de ferramenta utiliza-se para modelar curvas, entradas e saídas de rotundas e é associada aos veículos a circular na rede. Sendo que foram modeladas 183 zonas de redução de velocidade.

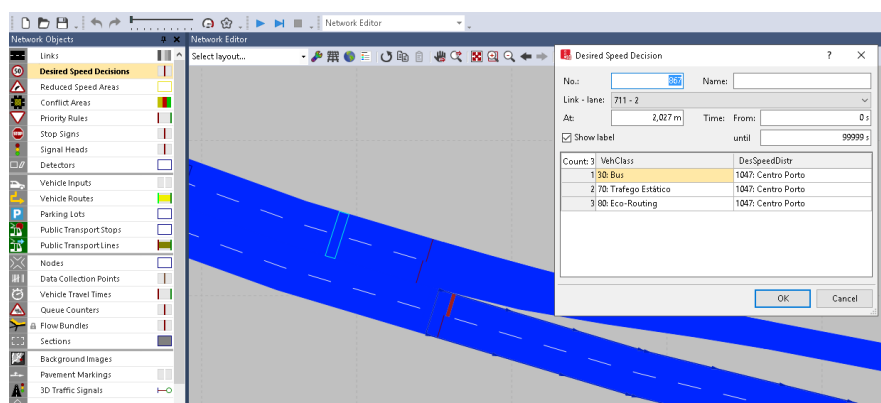


Figura 22: Utilização da ferramenta “*Desired Speed Decisions*”.

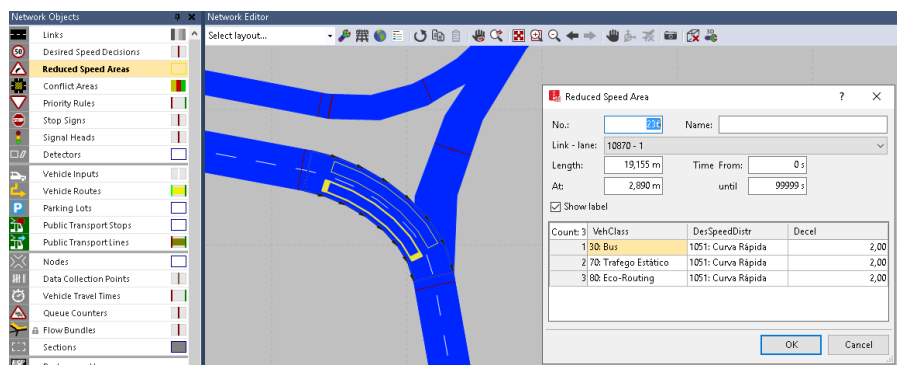


Figura 23: Utilização da ferramenta “*Reduced Speed Areas*”.

Após a caracterização dos parâmetros, foram definidas regras de prioridade nas intersecções usando a ferramenta “*Conflict Areas*” [49] para a criação de regras de prioridade entre os veículos na vias principais e secundárias (Figura 24). De modo a simplificar o processo de codificação da rede, e tendo em conta a dimensão do domínio de estudo, assumiu-se o valor igual de defeito para cada parâmetro das zonas de conflito.

A caracterização das zonas de conflito é de extrema importância visto um dos principais objetivos em trabalhos de simulação, ser que o modelo e os seus resultados se aproximem o máximo possível da realidade. Ora, as zonas de conflito são zonas onde se requer cedências de passagem, entradas e saídas de rotundas, interseções e cruzamentos, ou seja, zonas onde existe encontro de veículos ao realizarem a sua rota.

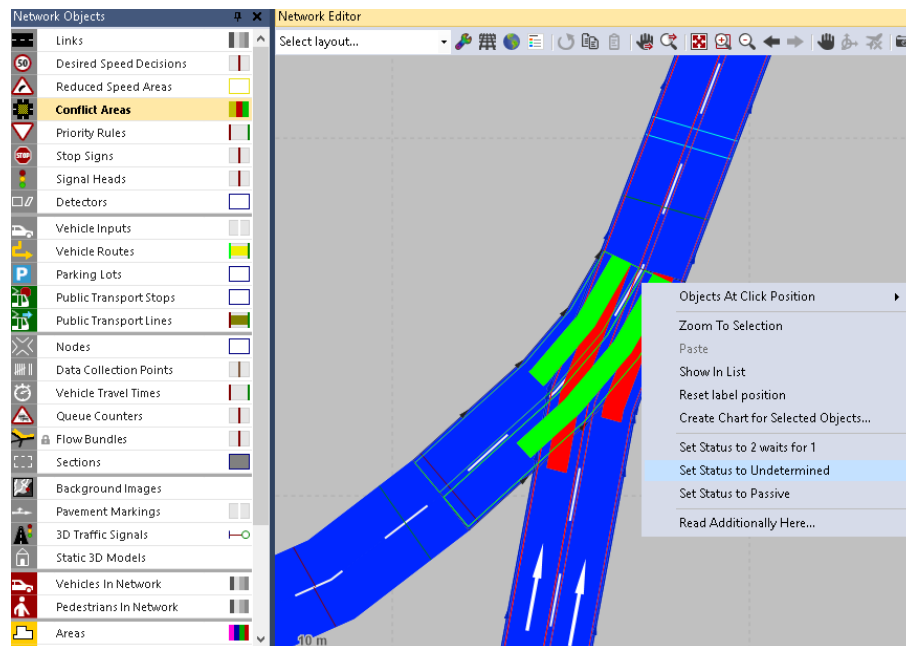


Figura 24: Utilização da ferramenta "Conflict Areas".

No caso das interseções com sinais luminosos, foi utilizada a ferramenta "Signal Heads" [49] nos quais se definiram os tempos de verde do sinal, sequência (amarelo, verde, vermelho) e o tempo total do ciclo (Figura 25). Neste caso, definiu-se uma temporização fixa do sinal durante o período da simulação uma vez que não foi possível obter os dados das temporizações dos sinais luminosos da rede. Apesar desta limitação, foi realizado o seu ajuste durante a calibração do modelo de tráfego. Assim, foram modelados 398 semáforos na rede.

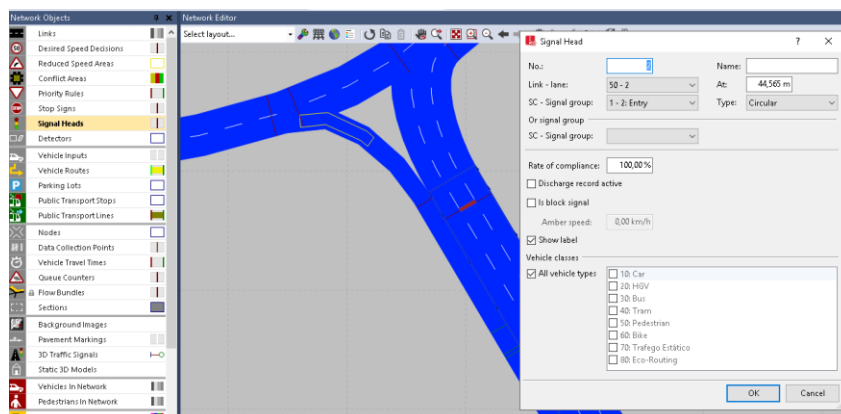


Figura 25: Utilização da ferramenta "Signal Heads".

Na área metropolitana do Porto residem 1,60 milhões de pessoas, e a cidade de Porto apresenta uma enorme centralidade ao ser das cidades com maior número de deslocações entrada, superando o número de habitantes num rácio de 126 entradas por 100 habitantes [66]. Apresentando assim o Porto uma das redes mais congestionadas, o Porto tem hoje uma rede de transportes públicos muito organizada, de entre estes o autocarro.

A modelação do transporte público consistiu na definição da localização das paragens dos autocarros ao longo da rede, na definição das linhas ao longo da rede e dos respetivos horários. Neste caso, foi realizada a identificação das rotas e os horários dos autocarros da STCP (Sociedade dos Transportes Colectivos do Porto) [67] e de outras companhias que diariamente circulam na rede criada, sendo destas apenas as linhas 104 e 119 da companhia Resende (no período da simulação que foi selecionado) [68].

Para o fazer, foi necessário a utilização da ferramenta "Public Transport Stops" [49] para a criação das diferentes paragens de autocarro na rede tal como se apresenta na Figura 26. No total foram inseridas 150 paragens de autocarro ao longo do domínio de estudo.

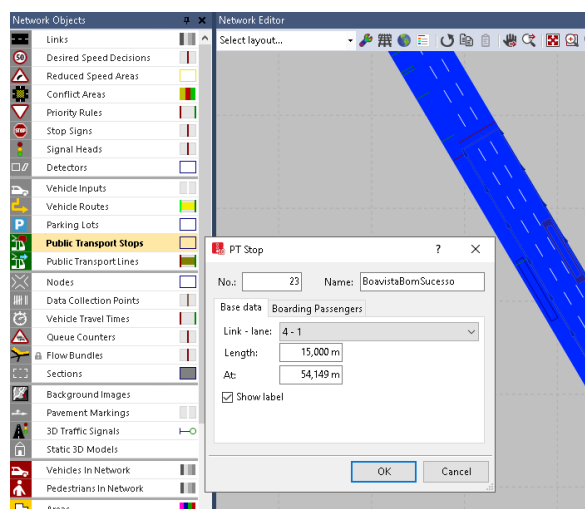


Figura 26: Utilização da ferramenta "Public Transport Stops" para a criação das paragens de autocarro.

Após a criação de todas as paragens, recorreu-se à ferramenta “Public Transport Lines” [49] para a definição de que paragens de autocarro deveriam ser utilizadas em cada linha e dos seus horários de partida, tal como se apresenta na Figura 27 e Figura 28. Em função das vias que foram modeladas, foram definidas 111 linhas de autocarro.

The screenshot shows the 'Public Transport Lines' software interface. It has a menu bar with 'Select layout...', 'Line stops', and 'Line stops'. Below the menu bar is a table with columns: Count, No, Name, EntryLink, DestLink, DestPos, EntTmOffset, VehType, and Dest. The table lists 111 bus lines, each with its corresponding stop and vehicle type. The right side of the interface shows a detailed view of a specific line, including its name, stop, and various settings like 'Active', 'SkipPass', 'DepOffset', 'PedAsPass', 'DwellTmDef', and 'Door'.

Count	No	Name	EntryLink	DestLink	DestPos	EntTmOffset	VehType	Dest
28	33	linha30a	399	266	85,344	0,0	300 Bus	50,50
29	34	linha30b	289	678	162,672	0,0	300 Bus	50,50
30	35	linha400	292	291	175,908	0,0	300 Bus	50,50
31	36	linha401	649	678	155,099	0,0	300 Bus	50,50
32	38	linha501z	645	10252	71,938	0,0	300 Bus	50,50
33	39	linha501z	234	623	232,525	0,0	300 Bus	50,50
34	40	linha503	57	311	102,832	0,0	300 Bus	50,50
35	42	linha507	10256	213	537,032	0,0	300 Bus	50,50
36	43	linha508	348	258	268,966	0,0	300 Bus	50,50
37	45	linha600z	389	266	78,267	0,0	300 Bus	50,50
38	46	linha601	234	213	537,124	0,0	300 Bus	50,50
39	49	linha700	649	652	43,168	0,0	300 Bus	50,50
40	50	linha701	166	97	126,689	0,0	300 Bus	50,50
41	51	linha703	289	10749	30,781	0,0	300 Bus	50,50
42	53	linha900	374	10764	18,831	0,0	300 Bus	50,50
43	54	linha901	374	291	165,355	0,0	300 Bus	50,50
44	55	linha902	57	10683	50,958	0,0	300 Bus	50,50
45	56	linha902z	642	160	160,136	0,0	300 Bus	50,50
46	57	linha903	57	10683	58,888	0,0	300 Bus	50,50
47	58	linha903z	642	310	22,189	0,0	300 Bus	50,50
48	59	linha904	291	644	31,688	0,0	300 Bus	50,50
49	60	linha905	291	644	21,962	0,0	300 Bus	50,50
50	61	linha906	374	291	170,513	0,0	300 Bus	50,50
51	62	linha907	596	598	123,626	0,0	300 Bus	50,50
52	63	linha907z	24	160	147,614	0,0	300 Bus	50,50
53	64	linhaZM	289	644	19,272	0,0	300 Bus	50,50
54	81	linha200	647	297	43,659	0,0	300 Bus	50,50
55	82	linha200z	234	598	1121,222	0,0	300 Bus	50,50
56	84	linha300z	365	422	140,199	0,0	300 Bus	50,50
57	85	linha302z	99	664	357,787	0,0	300 Bus	50,50
58	86	linha500z	554	554	691,453	0,0	300 Bus	50,50
59	87	linha1000z	214	289	98,962	0,0	300 Bus	50,50

Figura 27: Utilização da ferramenta "Public Transport Lines" para a criação das linhas de autocarro.

Como a simulação do modelo decorre entre as 17 horas e as 18 horas e 30 minutos (na secção 3.6 é apresentado a justificação deste período de tempo), os horários dos autocarros necessários pertencem a este período. Como os tempos na simulação se apresentam em segundos, os tempos de partida dos autocarros foi realizada em segundos, sendo que as 17 horas correspondem aos 0 segundos e as 18 horas e 30 minutos aos 5400 segundos, tal como se pode verificar em anexo na Tabela A.1 e na Tabela A.2.

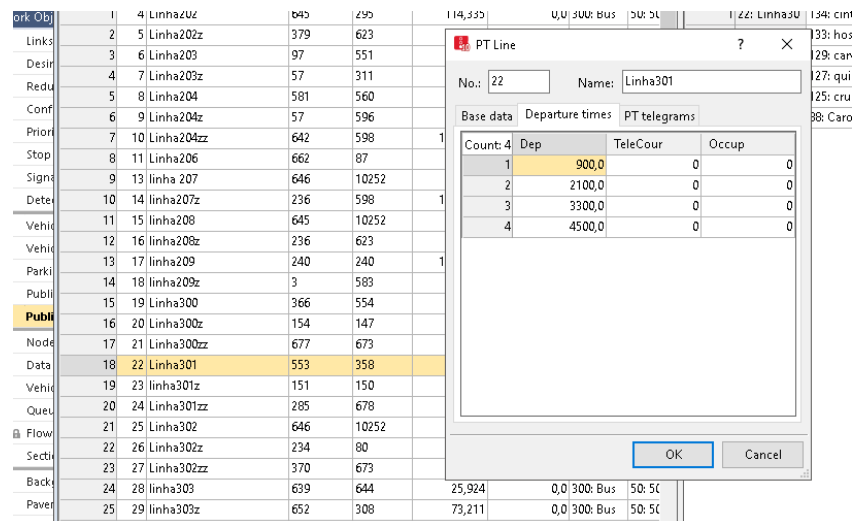


Figura 28: Tempos de partida dos autocarros.

Durante a modelação deste modo de transporte, foram ainda definidas as vias dedicadas ao uso do transporte público ao longo da rede viária modelada, tal como apresentado na Figura 29.

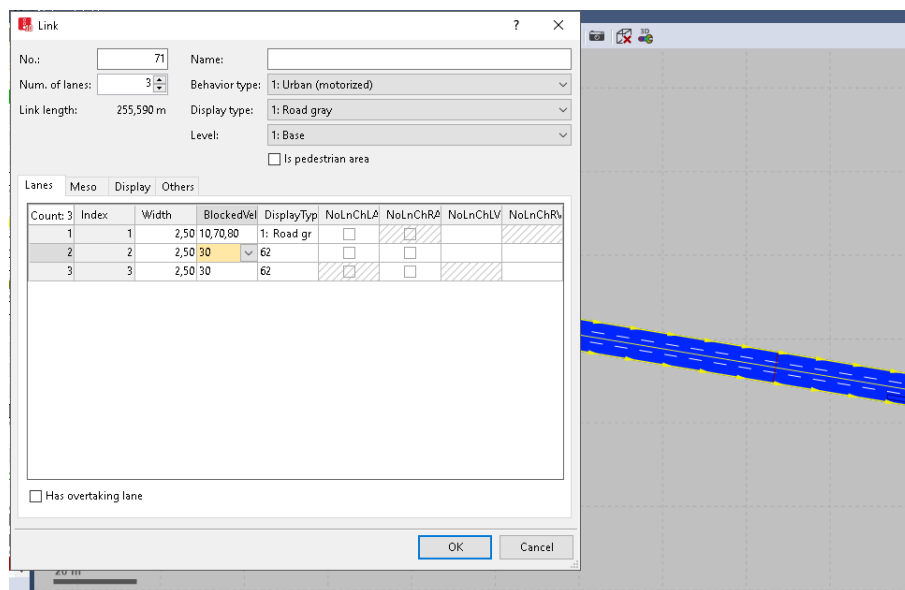


Figura 29: Definição das vias dedicadas ao transporte coletivo.

Concluída a modelação dos autocarros, passou-se a inserção dos outros veículos na rede e criação dos volumes de tráfego. Sendo para isso utilizado a ferramenta “*Vehicle Inputs*” [49] tal como apresentado na Figura 30.

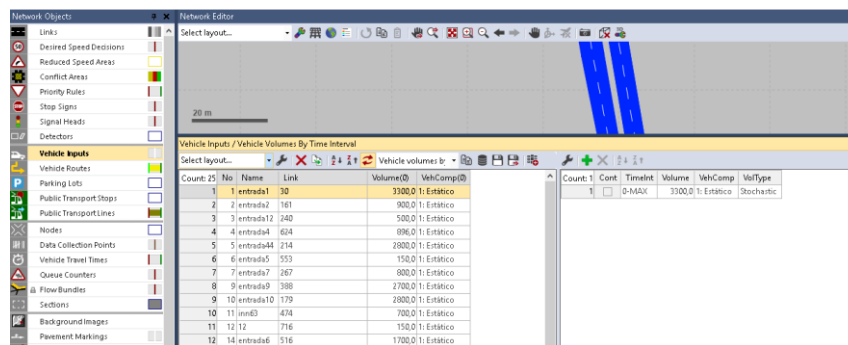


Figura 30: Criação dos volumes de tráfego usando a ferramenta "Vehicle Inputs".

Tal como foi referido anteriormente, os centroides da rede 1-7 (ver figura Figura 14) estão localizados em pontos onde não haviam espiras. Assim para ter acesso a dados de "Vehicle Inputs" na VCI e outras vias de acesso à rede recorreu-se ao Relatório de Tráfego na Rede Nacional de Autoestradas do 2º Trimestre de 2016 [69], para assim obter o tráfego médio observado na realidade (convertidos a uma base diária e para o período da hora de ponta) para colocar valores próximos nos "Vehicle Inputs" e assim ter volumes de tráfego mais próximos da realidade.

Os valores dos volumes de tráfego inseridos no modelo devem estar calibrados, ou seja, o número de veículos a circular na rede deve ser compatível com o observado no mundo real. Este processo irá ser explicado detalhadamente numa próxima secção.

3.6. Seleção do período de análise

Esta secção consistiu na análise dos dados das espiras relativos ao mês de abril de 2016 de forma a aferir qual o período de maior procura de tráfego para posterior calibração e validação do modelo de tráfego. Para isso, e tendo em conta os dias tipicamente úteis da semana (terça-feira, quarta-feira e quinta-feira), compararam-se as contagens de tráfego em 8 intervalos de 30 minutos no período de ponta da manhã (7h30 – 11h30) e 8 no período da tarde (16h30 – 20h30). A Tabela 8 e a Figura 31 apresentam o valor médio da contagem de veículos dos intervalos em análise por cada dia. A análise dos dados das espiras confirmam que o período entre as 17h30 e 18h30 apresentou, na maior parte dos casos, os valores mais elevados de volumes de tráfego.

Tabela 8: Volumes de tráfego em dias tipicamente úteis no período de ponta da manhã e no período de ponta da tarde, em intervalos de 30 minutos.

Hora	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Valor médio
07:30 - 08:00	12120	13996	14682	13599
08:00 - 08:30	17440	21544	22440	20475
08:30 - 09:00	17958	23449	22883	21430
09:00 - 09:30	17859	21818	21505	20394
09:30 - 10:00	17710	19899	19980	19196
10:00 - 10:30	17533	18641	19432	18535
10:30 - 11:00	17329	18508	18789	18209
11:00 - 11:30	17218	19044	18496	18253
16:30 - 17:00	22230	21646	21764	21880
17:00 - 17:30	22818	22646	22150	22538
17:30 - 18:00	23458	23130	22453	23013
18:00 - 18:30	23678	23036	22753	23155
18:30 - 19:00	23697	22589	22702	22996
19:00 - 19:30	22622	22380	22417	22473
19:30 - 20:00	19782	20553	18751	19695
20:00 - 20:30	16710	18505	16250	17155

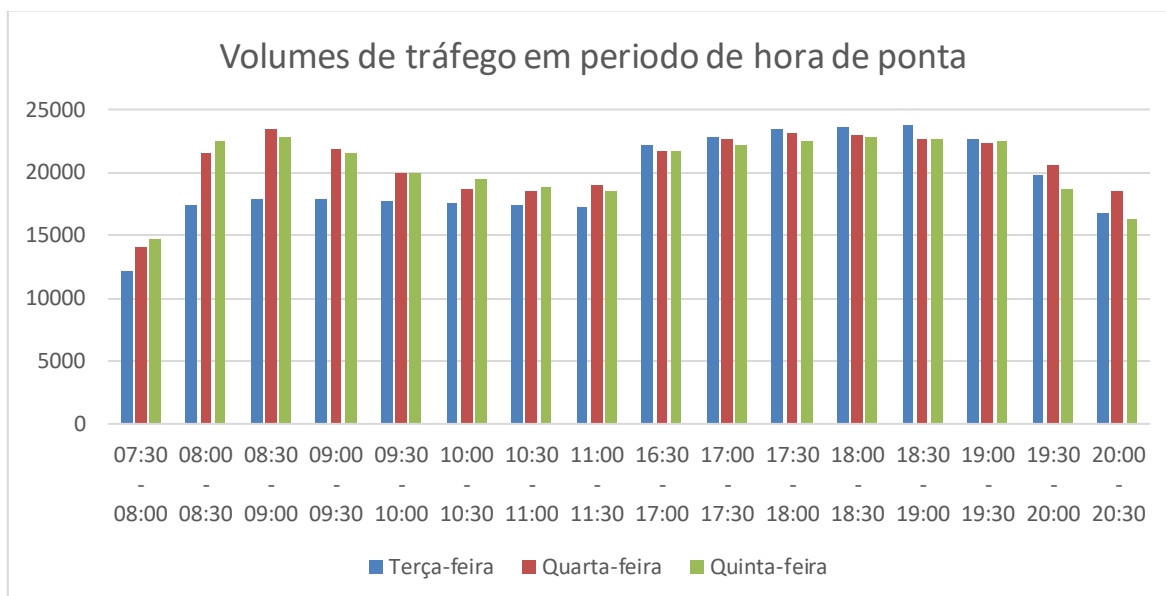


Figura 31: Volumes de tráfego em dias tipicamente úteis em horas de ponta, em períodos de 30 em 30 minutos.

Face ao exposto anteriormente, foi selecionado o período entre as 17 horas e 30 minutos e as 18 horas e 30 minutos relativo à primeira e segunda semana de abril para calibração e validação, respetivamente, das contagens de tráfego obtidas nas espiras.

Assim, a simulação do modelo foi feita num período de 1 hora e 30 minutos (17h00–18h30), sendo que os primeiros 30 minutos serviram para aquecimento da rede (os veículos

accedem à rede a partir dos centroides, de modo a que no período de análise os veículos circulem em toda a extensão da mesma). O período de aquecimento (17h00 – 17h30) não foi considerado durante as fases posteriores desta Dissertação, sendo a análise centrada no período entre as 17h30 e as 18h30.

3.7. Calibração e Validação

A calibração e validação são fundamentais para alcançar resultados mais precisos e ainda replicar de forma fiel as características do domínio de estudo.

A calibração dos modelos de microssimulação não é um método linear, mas é necessário garantir que a mesma permita no fim permita obter resultados aceitáveis de acordo com os critérios definidos para a aceitação do processo de calibração. Apenas no fim do processo de calibração, o modelo estará pronto para a realização das simulações pretendidas, neste caso concreto, da simulação dos cenários do estudo de caso.

A calibração da rede consistiu em dois passos. No primeiro passo, os volumes de tráfego observados nos dados recolhidos das espiras (fornecidos pela Doutora Ana Cristina Aguiar e pela Câmara Municipal do Porto) foram comparados com os dados retirados de simulações do modelo VISSIM. No segundo passo, foram comparados os tempos de viagem das rotas feitas ao longo da rede, observados na análise da dinâmica do veículo com os obtidos na simulação VISSIM.

Para a comparação dos volumes de tráfego do modelo criado com os volumes de tráfego reais, foram criados os nós na rede nos mesmos locais das espiras, tal como apresentado na Figura 13. Para tal, foi utilizada a ferramenta “nodes” [49] para a criação no modelo dos 27 nós tal como apresentado na Figura 32, de forma a comparar os volumes de tráfego medidos nos nós do modelo com os observados nos nós na realidade.

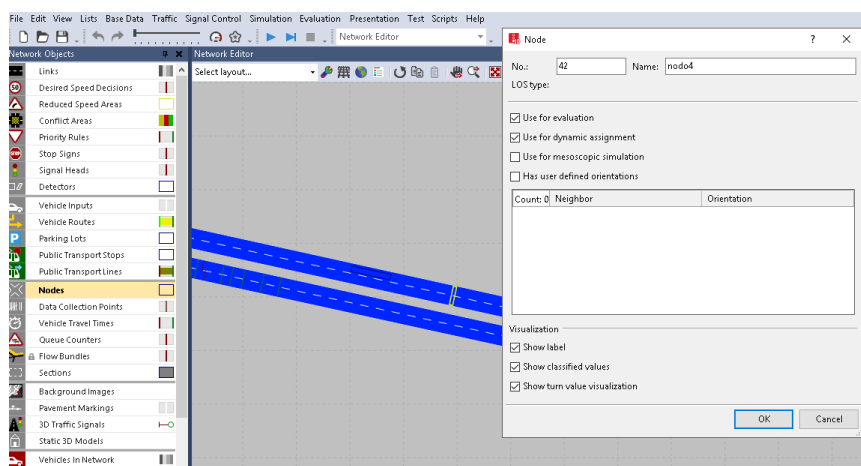


Figura 32: Utilização da ferramenta “Nodes” para a criação dos nós na rede.

A simulação de modelos de microssimulação necessita de considerações e cuidados prévios à realização da mesma. Para isso, primeiro acedeu-se à janela “Evaluation Configuration” disponível ao aceder ao menu “Evaluation” e seleccionando a opção “Configuration” [49], e configurou-se a recolha de dados nos nós no período de tempo desejado tal como mostrado na Figura 33.

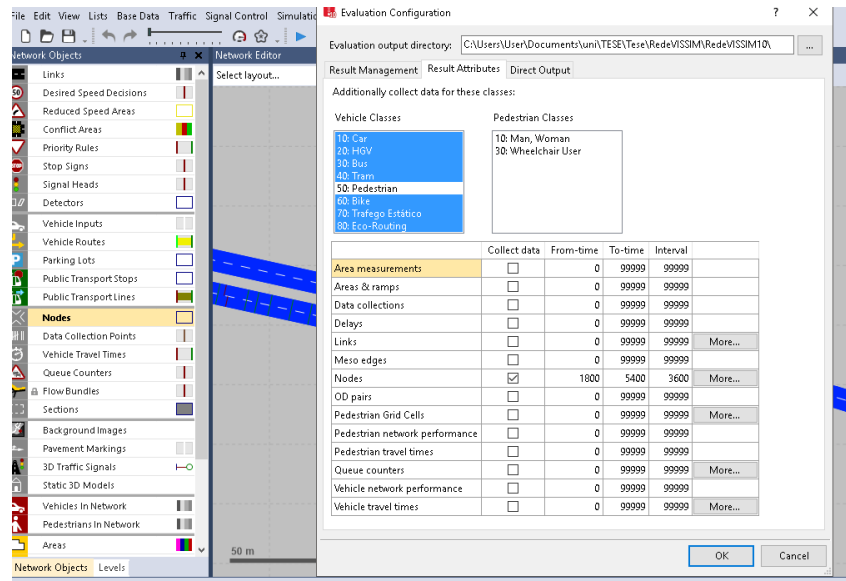


Figura 33: Utilização da ferramenta "Evaluation" para recolha dos volumes de tráfego nos nós criados na rede.

Assim, é possível ao fim de cada simulação e durante a mesma, consultar os volumes de tráfego medidos em cada nó através da ferramenta "Node Results" [49] disponível seleccionando a opção "Result Lists" através do menu "Evaluation", como apresentado na Figura 34.

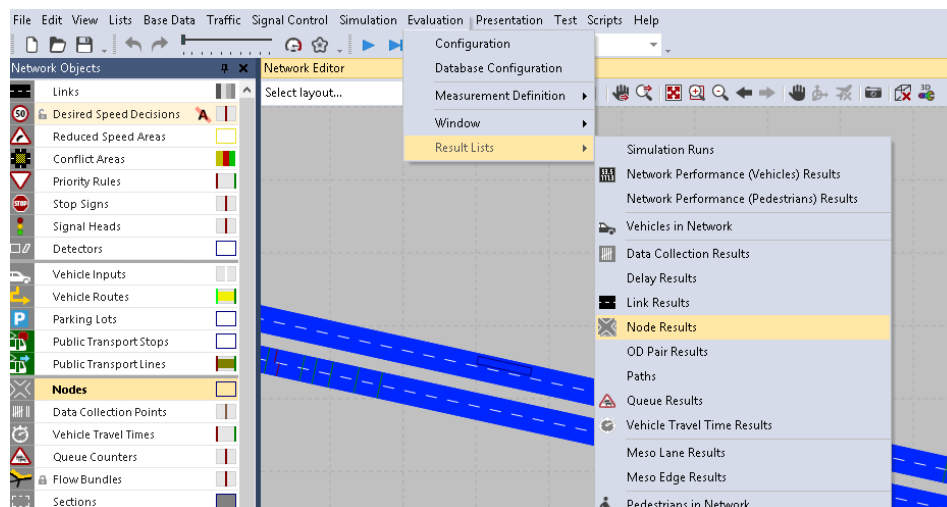


Figura 34: Utilização da ferramenta "Node Results" para controlo dos volumes de tráfego nos nós do modelo.

O critério de calibração consistiu no cálculo o índice de Geoffrey E. Havers (GEH) que permite avaliar a amplitude entre os valores observados e estimados (simulação).

O GEH é dado a partir da expressão 3:

$$GEH = \sqrt{\frac{2(m-c)^2}{m+c}} \quad (3)$$

Onde:

- GEH : índice de Geoffrey E. Havers;
- m : volume de tráfego simulado (vph);
- c : volume de tráfego observado (vph).

Os valores de GEH podem-se categorizar nos seguintes intervalos:

- $GEH < 4$: o fluxo de tráfego é considerado bom;
- $4 < GEH < 10$: O fluxo de tráfego necessita de ajuste;
- $GEH > 10$: o fluxo de tráfego não pode ser considerado [70].

Depois de analisar os dados e com a utilização do GEH , apresenta-se na Tabela A.3 os resultados obtidos do índice de GEH , nos 27 nós analisados. Verificou-se que 23 dos 27 nós (85%) registaram valores de GEH abaixo de 4 e que dois dos nós apresentam um índice GEH próximo de 4 (4,11 e 4,19), o que permitiu cumprir o critério de calibração sugerido na literatura [70]. O gráfico de dispersão na Figura 35 mostra um ajuste muito bom (coeficiente de determinação R^2 de 98%) entre os dados estimados e observados [70].

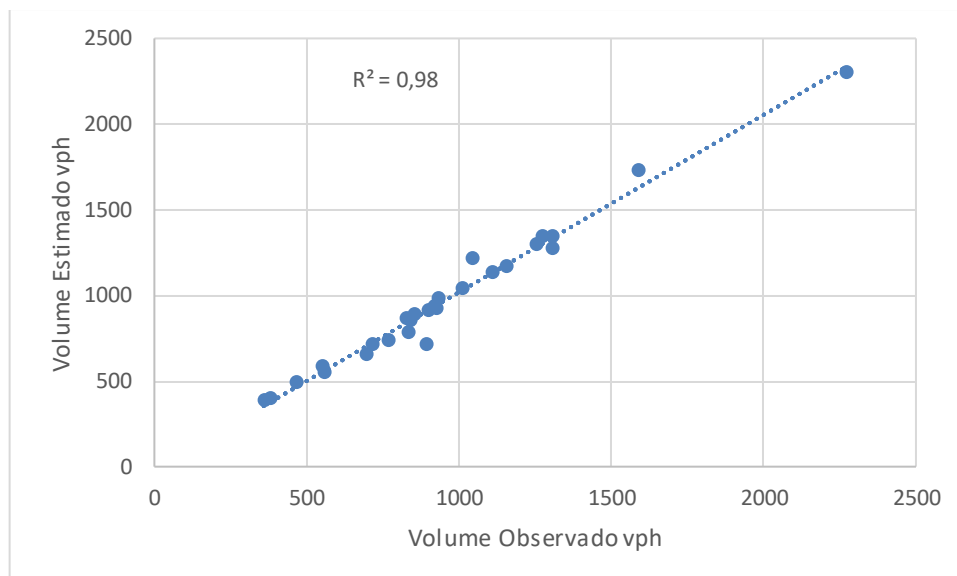


Figura 35: Gráfico de dispersão da calibração dos volumes de tráfego do modelo, no período entre as 17h30 e as 18h30.

Posteriormente foi realizada a calibração dos tempos de viagem dos veículos do modelo. Para isso, recorreu-se aos dados recolhidos nas medições da dinâmica do veículo comparando-os com as médias dos tempos de viagem estimados no modelo em cada uma das rotas realizadas.

Assim a comparação foi realizada com 30 carros flutuantes [71] (amostra de veículos a realizarem cada rota no modelo VISSIM). Este número teve em conta o número de repetições, média e desvio padrão da amostra de cada rota de forma a garantir a variabilidade da mesma.

Assim, foram definidas 4 rotas (visto na rota 5 ter sido realizada apenas uma repetição com a utilização correta do dispositivo GNSS) das medições realizadas à dinâmica do veículo no modelo VISSIM, e depois simulados 30 veículos a realizar cada uma dessas rotas. Usando os ficheiros de trajetória, foram verificados os tempos de viagem de cada um desses veículos nas rotas. A forma

como são obtidos os ficheiros de trajetória será abordada aquando da simulação dos diferentes cenários e da obtenção dos dados pretendidos.

Na Tabela 9 apresenta-se os resultados de calibração dos tempos de viagem. As diferenças relativas entre os tempos observados e estimados variaram entre os 9% e os 39%. A rota 2 apresenta uma diferença relativa entre os tempos estimados e observados bastante superior aos restantes (39%) visto os tempos observados apresentarem também um desvio padrão superior, ou seja, durante as medições da dinâmica do veículo houve situações (congestionamento, acidentes) que fizeram os tempos de viagem observados não serem todos próximos, e como se pode verificar na Tabela 7 existiu uma medição nesta rota na qual se encontrou um acidente na VCI.

Os resultados mostram que todos os valores do p-value foram superiores ao nível de significância do teste (5%), o que permite concluir que as médias das amostras não são estatisticamente significantes [71]. Refira-se que durante este processo, os valores de temporização dos sinais luminosos e as zonas de redução de velocidade foram ajustadas de forma a aproximar os valores do modelo com os observados na realidade.

Tabela 9: Resultados da calibração dos tempos de viagem.

Rota	Tempo de viagem observado (s)	Tempo de viagem estimado (s)	Diferença Relativa (%)	P-Value
1	1055 ± 107	923 ± 41	-13%	0.165
2	1037 ± 394	635 ± 31	-39%	0.134
3	1189 ± 103	1054 ± 77	-11%	0.074
4	537 ± 98	489 ± 47	-9%	0.620

Após a calibração, foi analisada a robustez da plataforma de modelação na avaliação dos volumes de tráfego usando uma amostra diferente da calibração. A validação consistiu na comparação com os volumes de tráfego das espiras relativas à segunda semana do mês de Abril de 2016 no período entre as 17 horas e 30 minutos e 18 horas e 30 minutos usando os valores médios de 10 repetições aleatórias [70] (Tabela A.4 em anexo).

Ao analisar os dados verificou-se que o modelo respondeu de forma positiva a outros cenários de procura, tal como se pode verificar pelo R^2 que foi superior a 80% que demonstra que o modelo se adaptou bem a uma nova amostra e se apresenta o gráfico de dispersão na Figura 36 [70].

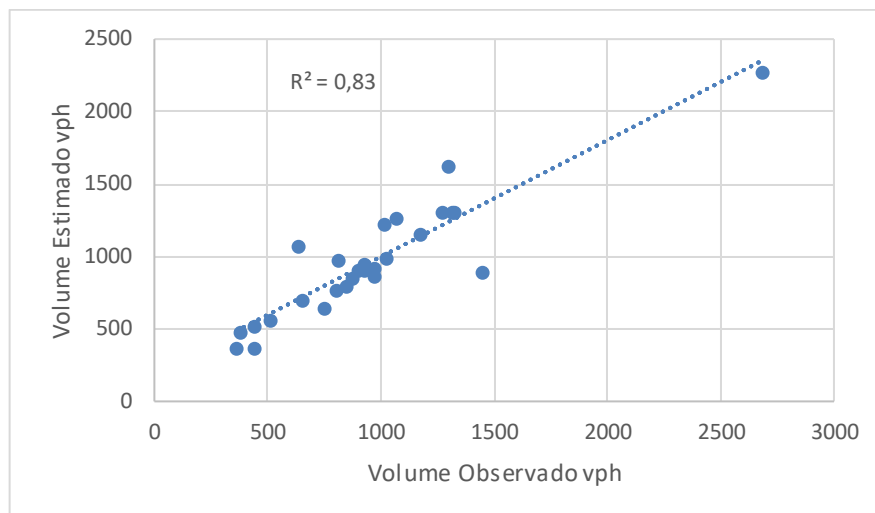


Figura 36: Gráfico de dispersão da validação dos volumes de tráfego do modelo, no período entre as 17h30 e as 18h30.

3.8. Estabelecimento de Cenários e Obtenção de dados

O cenário base diz respeito às condições atuais da rede no período de hora de ponta da tarde (17h30 – 18h30), no qual o modelo foi calibrado e validado. Nestes cenários, a rede viária consiste nos veículos convencionais (passageiros e comerciais) e ainda os autocarros urbanos que circulam na rede.

A composição do parque automóvel de veículos ligeiros para este estudo, baseou-se na realidade portuguesa 39% (33% - 1400cm³ + 6% - 1800cm³) passageiros a gasolina, 40% passageiros a gasóleo (1900cm³) e 21% comerciais ligeiros a gasóleo (2500cm³) [72].

Posteriormente, concretizou-se a implementação de 4 cenários alternativos com o objetivo de estudar o impacto dos VA ao longo da VCI, e assim verificar os resultados obtidos relativamente aos critérios de escolha de rota e os seus efeitos no funcionamento da rede.

A VCI foi definida com 77 “links” no VISSIM, apresentando uma extensão de cerca de 16 km entre os 2 sentidos. É composta por 2 faixas de rodagem com sentidos opostos, na sua maioria apresentam 3 vias de trânsito, apresentando também troços com 2, 4 e 5 vias.

Assim, foram criados os seguintes 4 cenários alternativos relativos a potenciais taxas de penetração de VA na rede:

- **Cenário Alternativo 1:** 10% dos veículos que atravessam a VCI são VA;
- **Cenário Alternativo 2:** 20% dos veículos que atravessam a VCI são VA;
- **Cenário Alternativo 3:** 30% dos veículos que atravessam a VCI são VA;
- **Cenário Alternativo 4:** 50% dos veículos que atravessam a VCI são VA;

Considerou-se que os veículos autónomos apenas circulam na VCI, sendo que estas percentagens anteriores tiveram em consideração o volume de tráfego de atravessamento ao longo mesma.

Uma vez que os VA apresentam um comportamento diferente dos veículos convencionais, é necessário na criação do tipo de veículo de modificar alguns parâmetros chave. Como o modelo Wiedemann 99 permite a configuração de um número maior de parâmetros relativamente ao Wiedemann 74, torna-se assim o modelo mais adequado para a criação dos veículos autónomos [73]. O modelo Wiedemann é caracterizado por 10 parâmetros, designados de CC0-CC9, e que personalizam aspetos de 4 modos de condução, sendo os mesmos a condução livre, aproximação ao veículo, seguimento do veículo e travagem [74].

Cada um dos parâmetros representa uma característica única no comportamento do veículo. Os primeiros 4 parâmetros (CC0- CC3) referem-se à distância entre veículos, os parâmetros (CC4-CC6) dizem respeito às velocidades de seguimento do veículo, enquanto os parâmetros (CC7-CC9) representam as acelerações e os últimos 2 parâmetros são relativos à mudança de via de trânsito (Min. Headway e Safety Distance Reduction Factor). É agora resumidamente, explicado cada um dos parâmetros:

- CC0 (*Stopped Condition Distance*) – é a distância de paragem relativa ao veículo da frente, mais concretamente o espaçamento que o condutor deseja manter em relação ao veículo da frente quando estes se encontram parados. Este parâmetro é usado no cálculo da distância de segurança juntamente com o parâmetro CC1 e sendo uma distância é representada em metros;
- CC1 (*“Headway Time”*) – fator que controla a velocidade relativa à distância de segurança com impacto na capacidade das estradas e é representado em segundos;
- CC3 (*“Threshold for entering Following”*) – relativo ao momento em que o condutor inicia a desaceleração até chegar à distância de segurança, e representado em segundos;
- CC4 e CC5 (*“Following Thresholds”*) – são os parâmetros que controlam a velocidade quando o veículo segue atrás de outro. Valores absolutos mais baixos significam uma maior capacidade de reação do condutor em relação a acelerações ou desacelerações do veículo da frente. Estes parâmetros são representados em m/s;
- CC7 (*“Oscillation Acceleration”*) – relativo à aceleração de oscilação, ou seja, a capacidade de aceleração em situações de congestionamento. É representado em m/s^2 e valores mais altos representam uma condução mais agressiva;
- CC8 (*“Standstill Acceleration”*) – representa a capacidade de aceleração do veículo quando este se encontra parado, sendo representado em m/s^2 ;
- CC9 (*“Acceleration at 80 km/h”*) – capacidade de aceleração do veículo quando este circula a 80 km/h, representado em m/s^2 [75].

Alguns parâmetros de mudança de via foram alterados, sendo os mesmos explicados de seguida:

- “*Min. Headway*” (frente/trás) – representa a distância mínima em relação ao veículo seguinte que tem que estar disponível antes de realizar a mudança de via de trânsito.
- “*Safety Distance Reduction Factor*” – fator que tem em conta a presença dos veículos na via contrária e reduz a própria distância de segurança até ser efetuada a mudança de via [75].

Tendo conta estes parâmetros, apresenta-se de seguida na Tabela 10 os valores utilizados (valores calibrados em estudos anteriores para vias desta tipologia [76]) na caracterização dos VA que circulam na rede nos cenários alternativos, e a sua criação na Figura 37 e na Figura 38. Na Tabela 10, são também apresentados os parâmetros utilizados para os veículos convencionais.

Tabela 10: Parâmetros utilizados nos veículos autónomos (com utilização do modelo de Wiedemann 99) comparativamente aos usados nos veículos convencionais.

Parâmetros	Valores Padrão	Valores Veículos Autónomos
CC0 (m)	1,50	1,47
CC1 (s)	0,9	1
CC3 (s)	-8,00	-13,54
CC4 (m/s)	-0,35	-0,13
CC5 (m/s)	0,35	0,13
CC7 (m/s²)	0,25	0,08
CC8 (m/s²)	3,50	3,72
CC9 (m/s²)	1,50	1,60
<i>Min. headway (Frente/Trás) (m)</i>	0,50	0,70
<i>Safety Distance Reduction Factor</i>	0,60	0,21

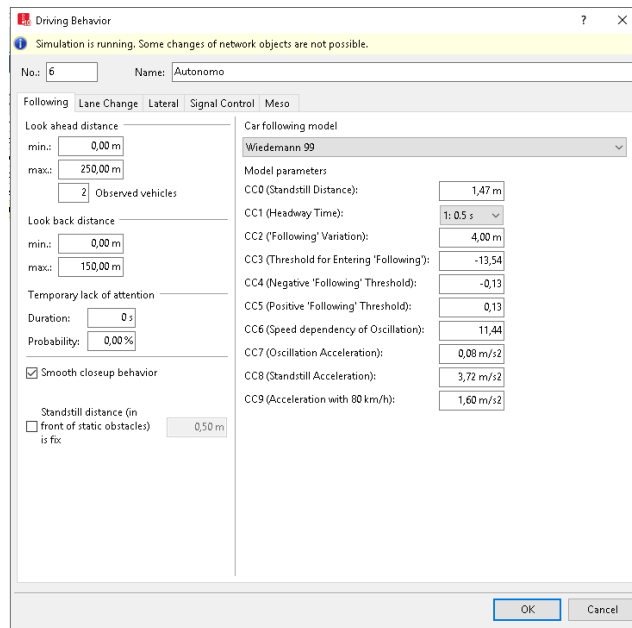


Figura 37: Criação do comportamento de condução alterando os 10 parâmetros do modelo de Wiedemann para a criação de VA na rede.

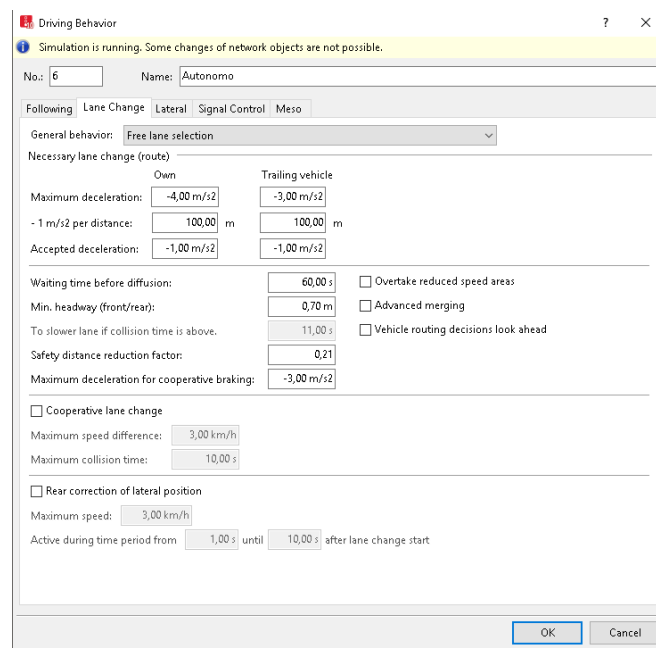


Figura 38: Alteração dos parâmetros de mudança de via no comportamento de condução dos VA.

Tal como foi explicado previamente, a simulação avaliou o período entre as 17h30 e 18h30, e que correspondem ao intervalo de simulação entre os 1800 e 5400 segundos, perfazendo um total de 5 repetições estocásticas no cenário de referência, e nos cenários alternativos 1,2,3 e 4.

Assim, para cada um dos cenários, foram realizadas 5 simulações com fatores de aleatoriedade diferentes (aleatoriedade estocástica), através do uso de “random seeds”. Sendo 5

simulações, foram utilizadas 5 “*random seeds*”, desde o valor 1 ao valor 5 para cada um dos cenários. Desta forma, foi possível obter uma amostra de dados relativamente significativa.

Para obter os dados de saída do modelo, foi feita uma análise individual das trajetórias dos veículos (para posterior cálculo das emissões no VSP) e ainda a recolha dos parâmetros de desempenho do tráfego em cada segmento.

A avaliação dos dados de saída das simulações para cada cenário, recorreu-se à ferramenta do VISSIM “*Simulation Parameters*” [49] para configurar os parâmetros de simulação. Na Figura 39 é apresentado um exemplo de configuração da ferramenta “*Simulation Parameters*” de forma a realizar as 5 simulações pretendidas em cada cenário. Na mesma figura verifica-se que a resolução da simulação foi de 10 passos de tempo por segundo de simulação de forma a garantir os dados de saída segundo a segundo. Assim, foi feita a sincronização da resolução temporal do modelo de tráfego e o de emissões.

Simulation parameters

General Meso

Comment:

Period: 5400 Simulation seconds

Start time: 00:00:00 [hh:mm:ss]

Start date: [DD.MM.YYYY]

Simulation resolution: 10 Time step(s) / Sim. sec.

Random Seed: 1

Number of runs: 5

Random seed increment: 1

Dynamic assignment volume increment: 0.00 %

Simulation speed: ☐ 10.0 Sim. sec. / s
☒ Maximum
☐ Retrospective synchronization

Break at: 0 Simulation seconds

Number of cores: use all cores

OK Cancel

Figura 39: Configuração da ferramenta “*Simulation Parameters*” com os parâmetros de simulação pretendidos.

Com a configuração dos parâmetros de simulação realizada, foi posteriormente necessário configurar no VISSIM que dados eram necessários recolher e de que forma seria feita. Para tal, recorreu-se à ferramenta “*Evaluation Configuration*” [49], para na secção “*Direct Output*” escolher as opções que permitem retirar os dados de trajetórias dos veículos (veículos convencionais, autocarros urbanos e autónomos) no período desejado das simulações (1800-5400 segundos) tal com apresentado na Figura 40.

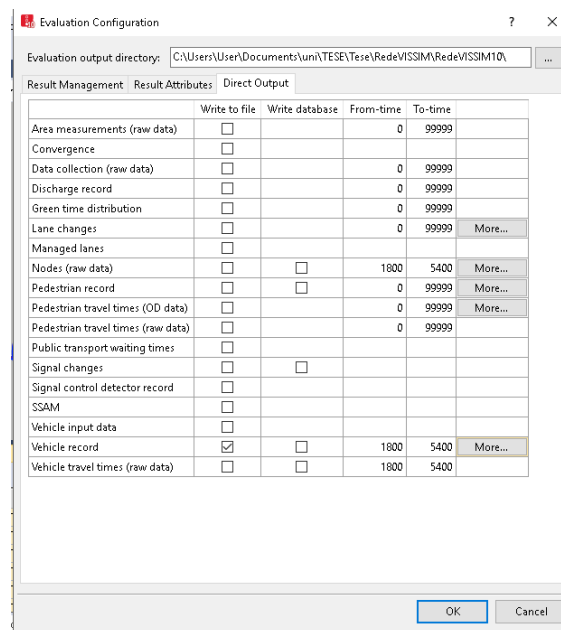


Figura 40: Configuração da ferramenta "Evaluation Configuration" para a recolha dos dados dos veículos nas simulações.

Posteriormente, foi necessário configurar os parâmetros da recolha de dados nos ficheiros de trajetórias. Assim, tal como exposto na Figura 41, foi escolhido os veículos que era pretendido retirar os dados nas simulações.

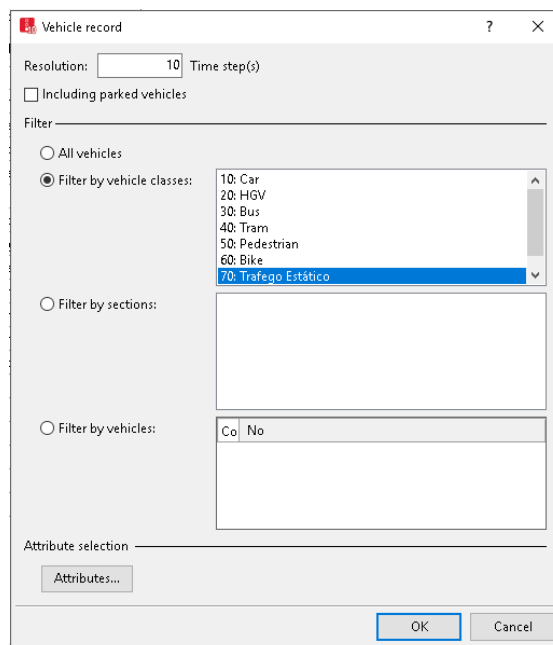


Figura 41: Escolha dos tipos de veículos que é pretendido fazer a recolha dos dados nas simulações.

A Figura 42 apresenta os dados de saída do modelo: o tempo de simulação (para verificar o tempo de cada veículo na rede, e no caso de realização de uma rota específica, o seu tempo de viagem nessa rota), o número do veículo, o número do “Link”, o número do tipo de veículo, o nome do tipo de veículo, a velocidade do veículo e o número de paragens.

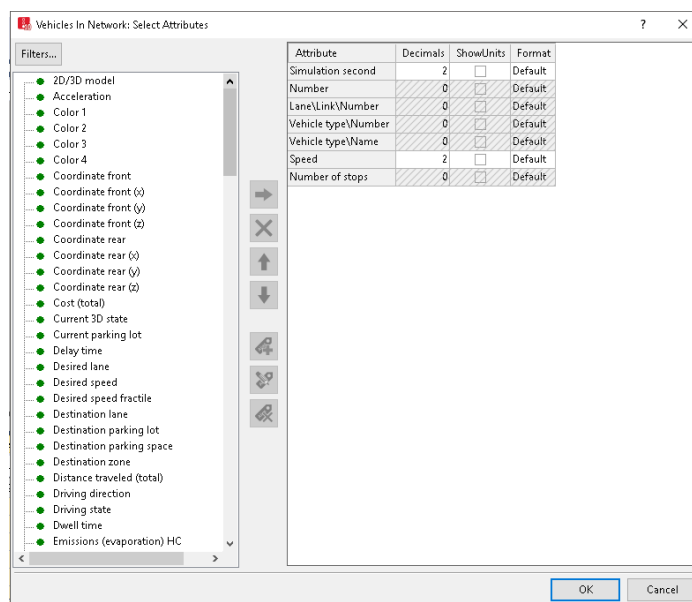


Figura 42: Escolha das variáveis a serem recolhidas nos dados extraídos das simulações do VISSIM.

Os dados discutidos anteriormente foram obtidos para os veículos convencionais e autónomos e para os autocarros urbanos, separadamente em cada uma das 5 simulações realizadas para cada cenário. Isto porque a metodologia de cálculo do VSP é diferente para os veículos convencionais e autónomos por um lado e os autocarros urbanos pelo outro (ver secção 3.2).

Face à dimensão do ficheiro de trajetória dos veículos (mais de 60 milhões de registos por cada simulação), foi implementado um código em Matlab para o cálculo do VSP e das emissões de CO₂, CO, NO_x e HC dos veículos analisados e agrupados por “links” (para posterior identificação dos pontos críticos da rede). O código também calculou o número de veículos a atravessar cada link para a obtenção das emissões por unidade de comprimento. A composição do parque automóvel de veículos ligeiros para este estudo, baseou-se na realidade portuguesa (39% ligeiros de passageiros a gasolina (33% - 1400 cm³ + 6% - 1800 cm³), 40% ligeiros de passageiros a gasóleo (1900 cm³) e 21% ligeiros comerciais a gasóleo (2500 cm³)) [61].

Relativamente ao ficheiro de trajetória dos autocarros urbanos, estes foram analisados em Excel, e executado o cálculo do VSP e das emissões CO₂, CO, NO_x e HC e depois agrupados por links (para serem somadas as emissões às dos veículos convencionais nos “Links” equivalentes e identificação dos pontos críticos da rede, tendo sempre em conta a mesma “random seed” da simulação). Foram ainda avaliadas as emissões de CO₂ e NO_x por unidade de comprimento.

No que diz respeito aos parâmetros de desempenho de tráfego (velocidade média, atraso relativo e densidade) foram obtidos com recurso à ferramenta VISSIM “Link Evaluation” [49] no período selecionado.

4. Apresentação e Discussão dos Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos ao nível do desempenho de tráfego e emissões de poluentes obtidos relativamente aos cenários de referência e os cenários alternativos 1,2,3 e 4. O impacto dos cenários avaliados foi feito para todo o domínio de estudo e ainda para a VCI em particular. Uma vez que os valores das emissões não foram calibrados com valores experimentais, a análise centrou-se mais nas diferenças relativas do que nos valores absolutos.

Em anexo, nas Tabelas A.5, A.6, A.7, A.8, A.9, A.10, A.11 e A.12 são apresentados o valor médio das emissões de cada poluente, da velocidade média, atraso relativo e a densidade média do cenário base comparativamente aos cenários alternativos, sendo assim possível analisar os resultados obtidos e verificar quais destes foram estatisticamente significativos.

O cálculo das emissões em gramas corresponde ao total que é emitido de cada poluente no “*Link*”, e quando calculado o valor médio de cada um destes poluentes em cada cenário, foi calculada a média das somas do total de cada “*Link*” por simulação, e assim obter um valor médio do total emitido de cada poluente na rede em cada cenário. Quando calculadas em g/km, para obtenção de um valor médio por cenário, foi então utilizado o valor médio por simulação tendo em conta o comprimento do “*Link*” e o número de veículos que circulam ao longo do mesmo.

Quanto ao cálculo das velocidades médias, do atraso relativo e da densidade média, foi também utilizado o valor médio por “*Link*”.

4.1. Identificação dos pontos críticos da rede em termos de emissões

A distribuição das emissões absolutas de CO₂ (um dos responsáveis pelo aquecimento global) geradas pelo tráfego ao longo do domínio de estudo no cenário de referência é dada pela Figura 43.

Sendo que para o mapa de emissões de CO₂ em gramas foi utilizado a seguinte escala:

- CO₂<5000: verde escuro;
- 5000<CO₂<10000: verde claro;
- 10000<CO₂<20000: amarelo;
- 20000<CO₂<40000: laranja claro;
- 40000<CO₂<60000: laranja escuro;
- CO₂>60000: vermelho.

Analisando os mapas de emissões de CO₂ a um nível mais local da rede verifica-se que existem várias zonas críticas no domínio de estudo tais como: Avenida dos Aliados, o Jardim de João de Chagas, a Praça do Marquês de Pombal, a Rua da Constituição e a Rua de Egas de Moniz, a Praça de Mouzinho de Albuquerque, a Avenida AEP e ainda a VCI, tal como patente nas Figura 44 a Figura 50.

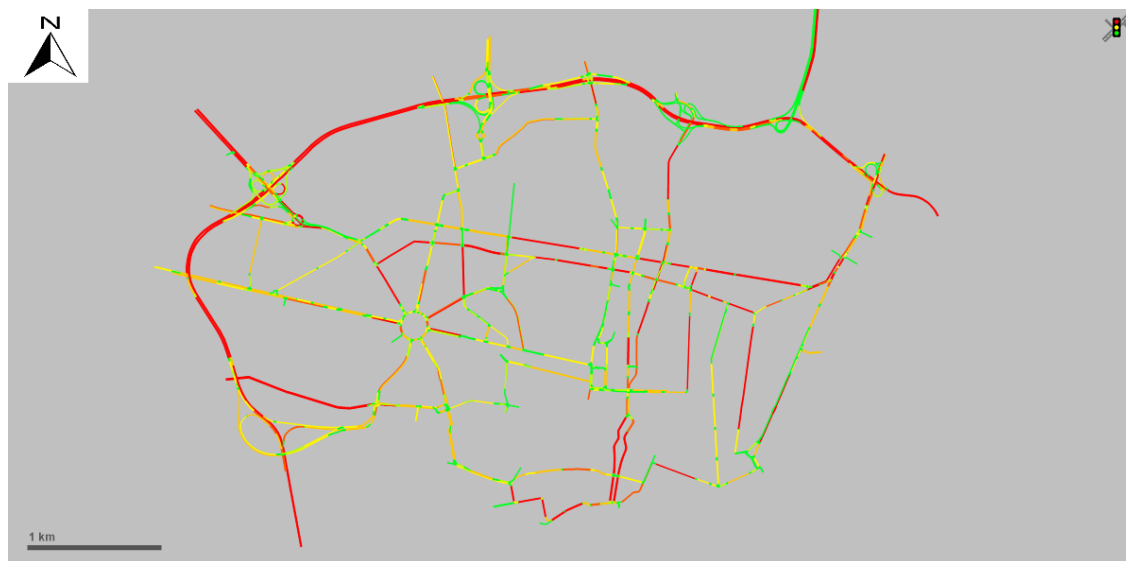


Figura 43: Mapa de emissões de CO₂ da rede, em gramas.

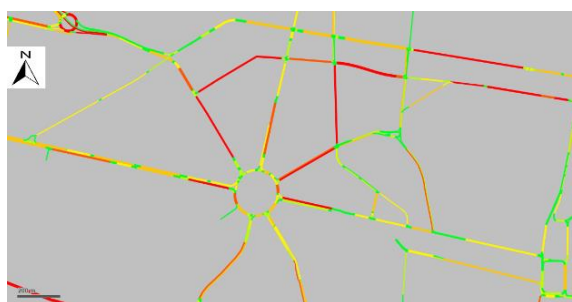


Figura 44: Mapa de emissões de CO₂ na Praça de Mouzinho de Albuquerque (Rotunda da Boavista), em gramas.

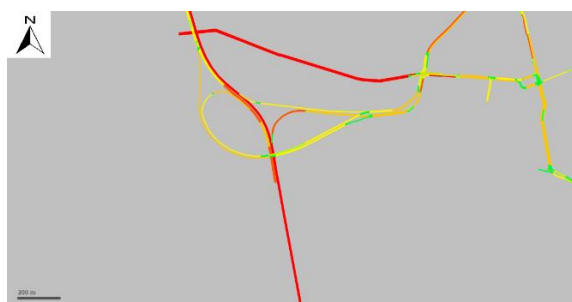


Figura 45: Mapa de emissões de CO₂ na entrada da rede pela ponte da Arrábida, em gramas.



Figura 46: Mapa de emissões de CO₂ na Avenida da AEP, em gramas.



Figura 47: Mapa de emissões de CO₂ na Avenida dos Aliados e junto ao Jardim de João Chagas (Cordoaria), em gramas.



Figura 48: Mapa de emissões de CO₂ no acesso à rede pelo Mercado Abastecedor, em gramas.



Figura 49: Mapa de emissões de CO₂ na Rua do Monte de Burgos e Rua do Amial, em gramas.



Figura 50: Mapa de emissões de CO₂ na Praça do Marquês de Pombal, Rua da Constituição e na Rua de Egas Moniz, em gramas.

Seguidamente são apresentadas as emissões de CO₂ por quilómetro ao longo do cenário de referência na Figura 51. Neste caso foi usada a seguinte escala para a construção do mapa de emissões:

- CO₂<200: verde escuro;
- 200<CO₂<250: verde claro;
- 250<CO₂<350: amarelo;
- 350<CO₂<400: laranja claro;
- 400<CO₂<500: laranja escuro;
- CO₂>500: vermelho.

Analisando os mapas de emissões de CO₂, verifica-se que existem várias zonas críticas na rede em estudo. Sendo estas, a Avenida dos Aliados, o Jardim de João Chagas, a Praça do Marquês de Pombal, a Rua da Constituição e a Rua de Egas de Moniz, a Praça de Mouzinho de Albuquerque, a Avenida AEP (Figura 44 a Figura 50). Em todas, se verifica volumes de tráfego elevados constantes o que implica constantes congestionamentos e logo onde se efetua uma condução com muitos pára-arrancas, que conduz a um aumento das emissões dos veículos.



Figura 51: Mapa de emissões de CO₂ na rede, em g/km por veículo.

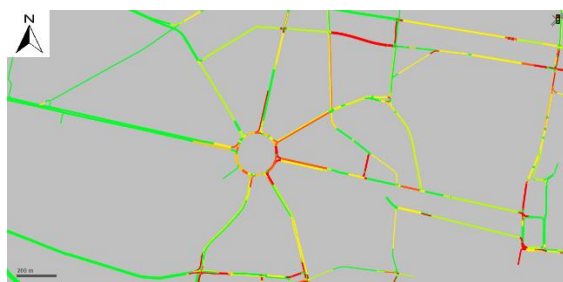


Figura 52: Mapa de emissões de CO₂ na Praça de Mouzinho de Albuquerque (Rotunda da Boavista), em g/km por veículo.

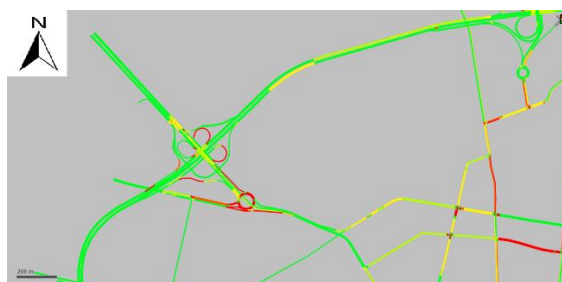


Figura 53: Mapa de emissões de CO₂ na Avenida da AEP, em g/km por veículo.



Figura 54: Mapa de emissões de CO₂ na Avenida dos Aliados e junto do Jardim de João Chagas (Cordoaria), em g/km por veículo.



Figura 55: Mapa de emissões de CO₂ no acesso pelo Mercado Abastecedor, em g/km por veículo.



Figura 56: Mapa de emissões de CO₂ na Rua do Monte de Burgos e Rua do Amial, em g/km por veículo.



Figura 57: Mapa de emissões de CO₂ na Praça do Marquês de Pombal, Rua da Constituição e na Rua de Egas Moniz, em g/km por veículo.

De seguida, apresentam-se nas figuras abaixo, os mapas de emissões de NO_x em gramas, totais por “Link” e em gramas por quilómetro ao longo do cenário de referência, em toda a rede e em zonas de interesse. Para o mapa de emissões de NO_x em gramas (Figura 58 a Figura 65) foi utilizado a seguinte escala:

- NO_x < 10: verde escuro;
- 10 < NO_x < 20: verde claro;
- 20 < NO_x < 50: amarelo;
- 50 < NO_x < 100: laranja claro;
- 100 < NO_x < 300: laranja escuro;
- NO_x > 300: vermelho.

Por sua vez, para o mapa de emissões de NO_x em gramas por quilómetro (Figura 66 a Figura 73), a seguinte escala:

- NO_x < 0,3: verde escuro;
- 0,3 < NO_x < 0,5: verde claro;
- 0,5 < NO_x < 1: amarelo;
- 1 < NO_x < 2: laranja claro;
- 2 < NO_x < 3,5: laranja escuro;
- NO_x > 3,5: vermelho.



Figura 58: Mapa de emissões de NO_x na rede, em gramas.

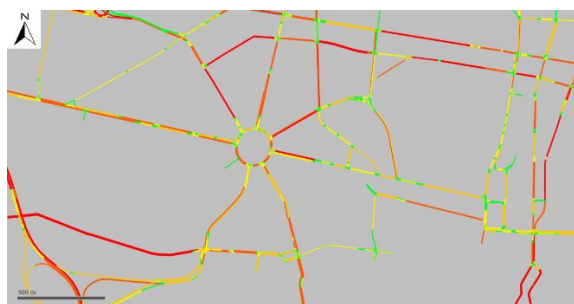


Figura 59: Mapa de emissões de NO_x na Praça de Mouzinho de Albuquerque (Rotunda da Boavista), em gramas.



Figura 60: Mapa de emissões de NO_x no acesso à rede pela ponte da Arrábida, em gramas.

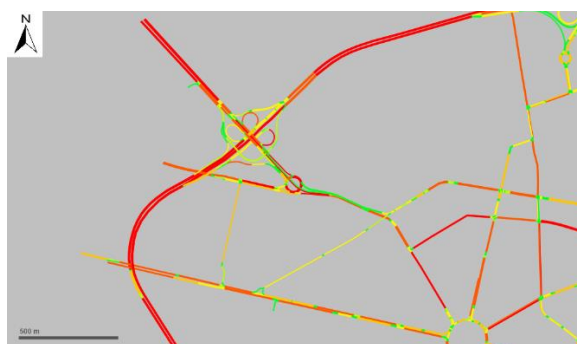


Figura 61: Mapa de emissões de NO_x na Avenida da AEP, em gramas.



Figura 62: Mapa de emissões de NO_x na Avenida dos Aliados e junto ao Jardim de João Chagas (Cordoaria), em gramas.



Figura 63: Mapa de emissões de NO_x no acesso à rede pelo Mercado Abastecedor, em gramas.

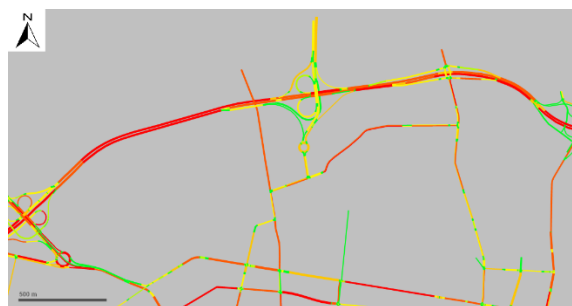


Figura 64: Mapa de emissões de NO_x na Rua do Monte de Burgos e Rua do Amial, em gramas.



Figura 65: Mapa de emissões de NO_x na Praça do Marquês de Pombal, na rua da Constituição e na rua de Egas de Moniz, em gramas.



Figura 66: Mapa de emissões de NO_x na rede, em g/km por veículo.

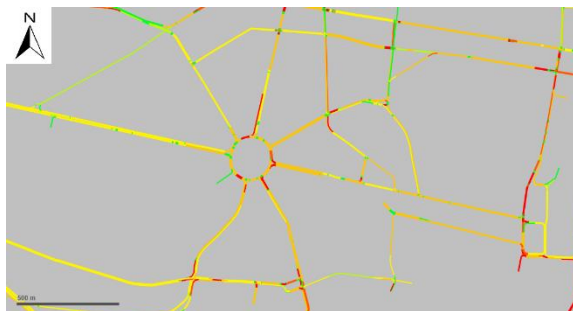


Figura 67: Mapa de emissões de NO_x na Praça de Mouzinho de Albuquerque (Rotunda da Boavista9, em g/km por veículo.



Figura 68: Mapa de emissões de NO_x no acesso pela ponte da Arrábida, em g/km por veículo.



Figura 69: Mapa de emissões de NO_x na Avenida da AEP, em g/km por veículo.

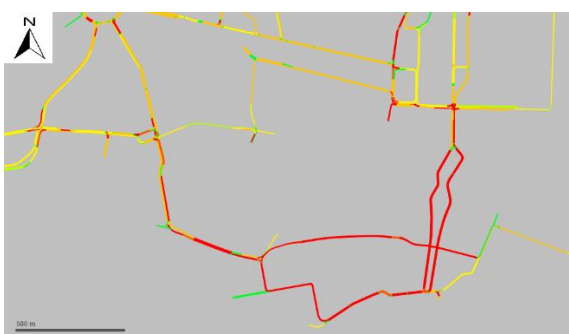


Figura 70: Mapa de emissões de NO_x na Avenida dos Aliados e junto do Jardim de João Chagas (Cordoaria), em g/km por veículo.

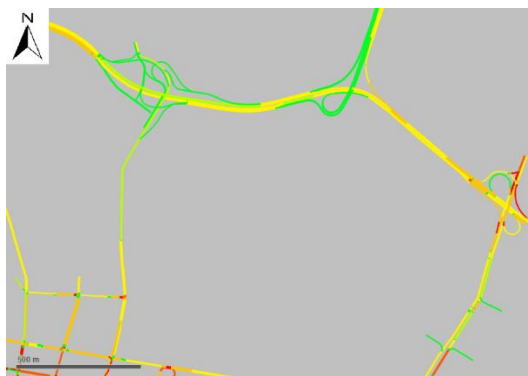


Figura 71: Mapa de emissões de NO_x no acesso pelo Mercado Abastecedor, em g.km por veículo.



Figura 72: Mapa de emissões de NO_x na Rua do Monte de Burgos e Rua do Amial, em g/km por veículo.



Figura 73: Mapa de emissões de NO_x na Praça do Marquês de Pombal, na rua da Constituição e na Rua de Egas de Moniz, em g/km por veículo.

Observando os mapas de emissões de NO_x, pode-se constatar que tal como nas emissões de CO₂, as zonas da Avenida dos Aliados e junto do Jardim de João Chagas, da Praça do Marquês de Pombal, a rua da Constituição, a rua de Egas de Moniz, a Praça de Mouzinho de Albuquerque, avenida da Associação Empresarial de Portugal, são também as principais contribuidoras de NO_x na rede.

É apresentado agora na Tabela 11 as contribuições destas zonas para as emissões absolutas da rede no cenário de referência.

Pode-se observar que as zonas onde os autocarros urbanos circulam com mais frequência apresentam uma contribuição superior às outras zonas para as emissões absolutas de HC da rede, sendo estas a Avenida dos Aliados (23,52%) e o Jardim João de Chagas (18,55%).

Para as emissões absolutas dos restantes poluentes, verifica-se que a Avenida da AEP é a principal contribuidora, o que é justificado pelo volume de tráfego que circula nesta zona que é consideravelmente superior ao das outras zonas, e que logo tem consequências no tipo de condução praticado nesta zona, uma condução de pára-arranca.

A Avenida dos Aliados devido ao maior volume de autocarros urbanos e ainda algum tráfego de veículos convencionais, aliados a várias intersecções luminosas com curta distância entre si, levam a situações de pára-arrancas que aumentam particularmente as emissões de CO e NO_x.

A Avenida de Fernão de Magalhães, a Rua de Egas de Moniz e a Rua da Constituição são das vias com maior volume de tráfego e, portanto, por vezes existem congestionamentos nestas vias. Isto associado aos semáforos que existem nestas vias, justificam que sejam das zonas com mais emissões absolutas da rede.

A zona do Contumil é das que apresenta mais emissões de CO₂, CO e NO_x face às restantes zonas, o que pode ser explicado pela circulação de um elevado volume de tráfego na VCI nesta zona, quer para acesso ou para saída da rede.

Pode-se assim também verificar que nas zonas onde existe maior tendência para congestionamentos e pára-arrancas, existe principalmente mais emissões de CO e NO_x face às outras zonas, o que indica que estes poluentes são principalmente libertados nestas ocasiões.

Tabela 11: Contribuição das principais zonas da rede para as emissões absolutas da mesma.

Zona	Contribuição (%)			
	CO2	CO	NOX	HC
Praça de Mouzinho de Albuquerque	2,58%	2,63%	2,63%	3,46%
Ponte da Arrábida	2,97%	2,97%	2,96%	3,55%
Avenida dos Aliados	4,82%	9,68%	9,21%	23,52%
Jardim João de Chagas	3,24%	7,55%	6,53%	18,55%
Avenida de Fernão de Magalhães	4,98%	4,12%	4,09%	3,06%
Contumil	5,43%	4,80%	4,64%	0,87%
Praça do Marquês de Pombal	2,82%	2,81%	2,67%	3,28%
Avenida da AEP	10,83%	10,43%	10,56%	3,41%
Bairro Silva Braga	3,37%	2,89%	2,77%	0,71%
Rua do Amial	1,13%	1,25%	1,18%	1,54%
Rua de Egas de Moniz	1,65%	1,61%	1,73%	2,15%
Rua da Constituição	4,38%	3,33%	3,42%	1,86%

4.2. Comparação das emissões e do desempenho de tráfego entre cenários

Esta secção apresenta e discute os resultados ao nível das emissões entre os cenários de referência e os cenários alternativos 1,2,3 e 4.

Os resultados obtidos para as emissões absolutas para o cenário alternativo 1 não foram estatisticamente significativos relativamente ao cenário base (Tabela A.5).

Para os cenários alternativos 2 e 3, as emissões absolutas de CO₂ foram estatisticamente significativas perante o cenário base, enquanto que no cenário alternativo 4, apenas as emissões absolutas de HC não foram estatisticamente significativas (Tabelas A.7, A.9, A.11).

Observando os resultados obtidos ao nível das emissões absolutas para todo o domínio de estudo (Tabela 12), à exceção do HC, todos os poluentes apresentaram emissões inferiores para todos os cenários. Sendo que se verifica que as emissões absolutas de CO₂ diminuem à medida que a taxa de penetração de VA aumenta. No que diz respeito ao CO e NO_x, existe um aumento das emissões entre o cenário 2 e 3, no entanto pode-se também constatar uma redução destas entre os 0,7% (Alternativo 1) e 3,9% (Alternativo 4) para o CO e entre os 0,7% (Alternativo 1) e os 3,6% (Alternativo 4) para o NO_x face ao cenário base. As emissões de HC aumentaram nos cenários alternativos 1 e 3, mas diminuem aproximadamente 4% face ao cenário base quando a taxa de penetração de VA é de 50%.

Tabela 12: Resultados obtidos para as emissões de CO₂, CO, NO_x e HC, em todo o domínio de estudo.

Cenário	CO ₂ (toneladas)	CO (kg)	NO _x (kg)	HC (kg)
Base	23,92 ± 0,25	39,13 ± 0,57	103,80 ± 1,42	445,48 ± 10,97
Alternativo 1	-1,52%	-0,68%	-0,65%	2,31%
Alternativo 2	-1,97%	-1,84%	-1,83%	-0,78%
Alternativo 3	-2,19%	-1,62%	-1,62%	1,11%
Alternativo 4	-3,00%	-3,90%	-3,64%	-4,29%

Analisando os resultados agora ao nível das emissões por comprimento em todo o domínio de estudo (Tabela 13), verificou-se que até uma taxa de penetração de VA de 30% as emissões de CO₂ diminuiram até 3,3% enquanto as emissões de NO_x por unidade de comprimento sofreram variações praticamente nulas (<0,5%).

Quando se analisa os resultados do cenário alternativo 4, observa-se valores de emissões por unidade de comprimento maiores, particularmente do NO_x que atinge um aumento de 8,9%. Este facto, poderá estar relacionado com os volumes de tráfego nas vias interiores da rede diminuírem com o aumento da percentagem de VA. Isto porque quando foi definida a penetração destes veículos, definiu-se uma rota de atravessamento da VCI para os mesmos e onde a sua taxa de penetração foi tida em conta nos volumes de tráfego dos veículos convencionais que entravam na rede no mesmo ponto de acesso. No entanto as percentagens das escolhas de rota dos veículos convencionais mantiveram-se do cenário base, significando que nos cenários alternativos circulem mais veículos na VCI e menos no centro da rede.

Assim, como as emissões absolutas de CO₂ e NO_x reduziram em toda a rede para o cenário 4, ao contrário das suas emissões por unidade de comprimento, pode-se verificar que o número de veículos no centro da rede diminuiu, aumentando consequentemente as emissões por unidade de comprimento pois o número de “Links” que constitui a VCI é muito inferior relativamente aos que constituem o resto da rede.

Os resultados obtidos para as emissões de CO₂ por unidade de comprimento ao longo do domínio de estudo foram estatisticamente significativos para os cenários alternativos 1, 3 e 4 relativamente ao cenário base. As emissões de NO_x por unidade de comprimento apenas foram estatisticamente significativas para o cenário alternativo 4.

Tabela 13: Resultados obtidos para as emissões de CO₂ e NO_x em g/km por veículo, em todo o domínio de estudo.

Cenário	CO ₂ (g/km)	NO _x (g/km)
Base	349,54 ± 1,547	1,650 ± 0,018
Alternativo 1	-1,66%	0,45%
Alternativo 2	-1,64%	0,25%
Alternativo 3	-3,29%	-0,35%
Alternativo 4	-1,80%	8,91%

Após a análise das emissões na rede toda, é pertinente fazer uma análise das mesmas na VCI, visto ser o local de circulação dos veículos autónomos. Apresenta-se na Tabela 14 e na Tabela 15 as emissões dos diferentes poluentes em análise na VCI.

Com a análise das emissões na VCI, verifica-se que as emissões absolutas são superiores para todos os cenários alternativos relativamente ao cenário base, aumentando consideravelmente quando aumenta a percentagem de VA na rede. Isto, excetuando as emissões dos HC que foram inferiores no cenário 2 relativamente ao cenário base e apresentam um decréscimo do cenário 3 para o cenário 4.

Verifica-se assim que tal como exposto anteriormente, o número de veículos que circula na VCI nos cenários alternativos aumenta face ao cenário base e logo as emissões absolutas nesta via aumentam. Apesar do aumento das emissões absolutas, o aumento da taxa de penetração de VA permitiu uma redução das emissões locais por unidade de comprimento, tal como exposto na Tabela 15, onde se verifica que com o aumento da taxa de veículos as emissões reduzem, principalmente no NO_x onde no cenário 4 as emissões reduziram em 10,9%. Assim, pode-se conduzir que apesar do aumento do número de veículos nas vias da VCI, o comportamento de condução dos VA permitiu um desempenho ao nível das emissões da via superior face ao caso base.

Tabela 14: Resultados obtidos para as emissões de CO_2 , CO, NO_x e HC, na VCI.

Cenário	CO_2 (toneladas)	CO (kg)	NO_x (kg)	HC (kg)
Base	$6,20 \pm 0,11$	$8,53 \pm 0,12$	$21,84 \pm 0,31$	$5,52 \pm 0,44$
Alternativo 1	3,40%	1,83%	2,31%	12,23%
Alternativo 2	8,85%	5,93%	6,26%	-7,33%
Alternativo 3	14,91%	11,03%	11,87%	13,74%
Alternativo 4	27,14%	21,16%	22,28%	4,76%

Tabela 15: Resultados obtidos para as emissões de CO_2 e NO_x em g/km por veículo, na VCI.

Cenário	CO_2 (g/km)		NO_x (g/km)	
	Valor Médio	Desvio Padrão	Valor Médio	Desvio Padrão
Base	191,845	1,956	0,693	0,009
Alternativo 1	-2,79%		-4,45%	
Alternativo 2	-4,10%		-7,48%	
Alternativo 3	-4,62%		-8,40%	
Alternativo 4	-5,83%		-10,91%	

Pode-se constatar na Tabela 16 que a VCI compõe entre 21,1% e 25,9% das emissões de CO_2 , CO e NO_x , e 1,2% para o HC. Tendo em conta que os principais contribuidores para as emissões

de HC na rede são os autocarros urbanos, é de esperar que a VCI tenha uma baixa contribuição na sua emissão (1,2%).

Apesar de representar uma boa parte das emissões, a VCI apresenta valores para as emissões por unidade de comprimento 55% e 42% inferiores aos valores médios do domínio de estudo para o CO₂ e NO_x, respetivamente.

Tabela 16: Contribuição das emissões absolutas da VCI para o domínio de estudo, no cenário base.

Zona	CO ₂ (toneladas)	CO (kg)	NO _x (kg)	HC (kg)
Domínio de estudo	23,92	39,13	103,80	445,48
VCI	25,92%	21,81%	21,05%	1,24%

Após a apresentação dos resultados das emissões, é agora apresentado a velocidade média de cada tipo de veículo (veículos convencionais ligeiros, autocarros urbanos) e os seus atrasos relativos (em percentagem), no domínio de estudo (Tabela 17). Analisando as velocidades médias de cada cenário, verifica-se que a velocidade aumenta quanto maior a percentagem de VA a circular na VCI. As diferenças no atraso relativo são mais significativas atingindo os 12% no cenário alternativo 4.

Os resultados obtidos para a velocidade média e atraso relativo dos veículos ligeiros foram estatisticamente significativos para todos os cenários alternativos perante o cenário base. O atraso relativo dos autocarros urbanos foi também estatisticamente significativo entre o cenário alternativo 4 e o cenário base.

Tabela 17: Resultados obtidos para a velocidade média e atraso relativo médio, no domínio de estudo.

Cenário	Velocidade Média Veículos Ligeiros (km/h)	Velocidade Média Autocarros Urbanos (km/h)	Atraso Relativo Médio Veículos Ligeiros (%)	Atraso Relativo Médio Autocarros Urbanos (%)
Base	45,96 ± 0,11	41,48 ± 1,19	0,21 ± 0,02	0,20 ± 0,008
Alternativo 1	1,59%	1,21%	-5,32%	-1,93%
Alternativo 2	2,40%	1,52%	-8,11%	-6,03%
Alternativo 3	3,04%	2,24%	-9,92%	-6,20%
Alternativo 4	4,61%	4,03%	-15,85%	-12,00%

É importante, agora analisar os resultados obtidos para a velocidade média e o atraso médio dos veículos que circulam na VCI (Tabela 18).

A velocidade média dos veículos ligeiros que circulam na VCI é superior quando a percentagem de VA na VCI é de 10% e 20%, no entanto, nos cenários alternativos 3 e 4 esta diminui e é mesmo inferior à do cenário base em 4,5%.

Na VCI, dado o aumento do volume de tráfego na mesma é de esperar que atingindo uma determinada taxa de penetração de VA, a via entre em congestionamento e tenha assim impacto na velocidade praticada.

No cenário 4 verifica-se que a velocidade média é 0,1% inferior à velocidade média do cenário base. No entanto, o atraso relativo é inferior em 11,3% para o cenário alternativo 4. Pode-se constatar, portanto que apesar do aumento de volume de tráfego na VCI e consequente redução da velocidade dos veículos nesta via, dado o aumento de VA, os veículos no geral apresentam um desempenho superior nos cenários alternativos, à exceção do cenário alternativo 3, face ao cenário base.

Tabela 18: Resultados obtidos para a velocidade média (km/h) e atraso relativo, na VCI.

Cenário	Velocidade Média (km/h)	Atraso Relativo (%)
Base	97,80 ± 1,04	0,0491 ± 0,0094
Alternativo 1	1,14%	-23,91%
Alternativo 2	1,03%	-23,41%
Alternativo 3	-4,53%	24,60%
Alternativo 4	-0,09%	-11,30%

Pela Tabela 19 pode-se confirmar que com o aumento da taxa de penetração dos VA na rede, a densidade decresce entre 6,3% e 21,7% nos cenários alternativos 1 e 4, respetivamente, face ao cenário base. Quanto à densidade de autocarros urbanos, os cenários alternativos apresentam aproximadamente o mesmo valor do cenário base, o que é esperado tendo em conta que os volumes de tráfego deste veículo não foram alterados nos cenários em estudo.

Os resultados obtidos para a densidade dos autocarros urbanos foram estatisticamente significativos para todos os cenários alternativos perante o cenário base.

Tabela 19: Resultados obtidos para a densidade média no domínio de estudo.

Cenário	Densidade Média Veículos Ligeiros (veículos/km)	Densidade Média Autocarros Urbanos (veículos/km)
Base	26,45 ± 0,41	0,67 ± 0,02
Alternativo 1	-6,39%	1,77%
Alternativo 2	-10,24%	-0,93%
Alternativo 3	-14,80%	1,44%
Alternativo 4	-21,65%	-4,06%

Observando a densidade dos veículos na VCI na Tabela 20, confirma-se que com o aumento da taxa de penetração dos VA na VCI, reduz-se o volume de tráfego dos veículos convencionais por unidade de comprimento da via, sendo que com uma taxa de penetração de 50% se observam menos 35,29% veículos convencionais do que no cenário base, pois esta redução de densidade é compensada pelos VA.

Tabela 20: Resultados obtidos para a densidade média na VCI.

Cenário	Densidade Média Veículos Convencionais (veículos/km)
Base	22,95 ± 1,11
Alternativo 1	-11,46%
Alternativo 2	-17,48%
Alternativo 3	-18,11%
Alternativo 4	-35,29%

5. Conclusões e Trabalhos Futuros

O trabalho realizado nesta Dissertação de Mestrado teve como principal objetivo a inclusão de novos critérios de definição na escolha de rotas de atravessamento para VA numa rede urbana pertencente à área metropolitana do Porto. O estudo de caso foi a rede da cidade do Porto interior à VCI sendo que os VA foram implementados ao longo desta última artéria.

Foi utilizado uma plataforma de modelação de tráfego (VISSIM) e uma metodologia para estimar as emissões dos gases de escape (VSP) do tráfego da rede. A plataforma foi calibrada e validada, posteriormente quatro cenários de taxas de penetração de VA ao longo da VCI foram estudados: 1) 10% VA; 2) 20% VA; 3) 30% VA e 4) 50% VA.

É objetivo nesta secção realizar uma avaliação e comparação dos objetivos desta Dissertação com os resultados obtidos e analisados no capítulo anterior. Para além disto, serão discutidas as principais conclusões e tarefas que não foram possíveis executar aquando da realização deste trabalho, e que podem, portanto, constituir futuros trabalhos.

Assim, com o desenvolvimento deste trabalho, as conclusões retiradas da análise dos resultados são as seguintes:

- As zonas mais sensíveis ao nível das emissões de CO₂ e NO_x foram a Avenida dos Aliados, a Praça Marquês de Pombal, na Cordoaria perto do Jardim de João Chagas, a Rua da Constituição, a Rua de Egas de Moniz, a Avenida AEP, a Praça de Mouzinho de Albuquerque e na VCI, tanto em termos absolutos como por unidade de comprimento;
- A VCI representou entre 21% e 25% das emissões absolutas de CO₂, CO e NO_x do domínio de estudo, mostrando-se como a zona crítica da rede (sendo o “*Link*” do domínio de estudo com maiores emissões absolutas pertencente a esta zona). No entanto, a VCI apresentou valores de emissões por unidade de comprimento 55% e 42% inferiores aos valores médios do domínio de estudo para o CO₂ e NO_x, respetivamente;
- Das restantes zonas da rede, a Avenida da AEP teve também um impacto significativo, apresentando emissões absolutas de CO₂, CO e NO_x no domínio de estudo na ordem dos 11%. Por outro lado, na emissão de HC, a Avenida dos Aliados (23,5%) e a zona do Jardim João de Chagas (18,6%) são os principais contribuidores, devido ao volume de tráfego de autocarros urbanos nestas zonas ser consideravelmente superior às restantes;
- No caso base que representa a situação atual no mundo real da rede em estudo, verifica-se que esta durante o período de análise, emitiu 23,92 toneladas de CO₂, 39,13 kg de CO, 103,80 kg de NO_x e 445,48 kg de HC;
- Analisando os resultados obtidos, o “*Link*” com mais emissões absolutas de CO₂ encontra-se na VCI enquanto que quando a análise foi feita por unidade de comprimento, o “*Link*” com emissões superiores encontra-se na Avenida dos Aliados. Isto ocorre dado a dimensão dos “*Links*” da VCI serem bastantes superiores aos links restantes. No entanto, tendo em conta que as dimensões da VCI são realmente bastante superiores, isto representa que a VCI acumula no seu trajeto mais emissões de CO₂ do que as restantes vias;
- A comparação dos cenários em termos de emissões absolutas no domínio de estudo, todos os cenários alternativos se mostraram promissores, tendo o aumento da penetração de VA diminuído as emissões de CO₂, CO e NO_x até 3,0%, 3,9% e 3,6%, respetivamente. Nas emissões de CO₂, o aumento da taxa de penetração de VA diminuiu as emissões, enquanto que nas emissões de CO e NO_x, quando se aumentou a taxa de penetração de VA de 20% para 30%, as emissões subiram

novamente. No entanto, no cenário alternativo 4 (50% VA) observaram-se as emissões absolutas mais baixas para todos os poluentes;

- Relativamente às emissões por unidade de comprimento, verifica-se que todos os cenários apresentam menores emissões de CO₂, face ao cenário base, atingindo o melhor resultado no cenário com 30% de VA com uma redução de 3,3%. Quanto ao NO_x, verifica-se que apenas no cenário alternativo 3 (30% VA) as emissões foram inferiores relativamente ao cenário base, tendo até no cenário alternativo 4 (50% VA) existido um aumento das emissões em 8,9%. Este aumento poderá estar relacionado com o aumento de veículos que circulam na VCI com o aumento da taxa de penetração de VA como exposto anteriormente, e que leva a um aumento dos congestionamentos na VCI e dos pára-arrancas. E tal como observado, as emissões de CO e NO_x para este tipo de condução aumenta;

- Quando analisadas as emissões totais na VCI, estas aumentaram à medida que a taxa de penetração de VA aumenta, mas são menores por unidade de comprimento. Isto porque por exemplo no cenário 1, quando se substituiu 10% dos veículos convencionais por VA e se criou a rota para estes veículos, ao deixar a mesma percentagem nas escolhas de rotas nos restantes veículos, fez-se com que nos cenários alternativos circulasse um número superior de veículos na VCI e menor no centro. Com isto, pode-se concluir que o aumento de VA a circular na VCI fez diminuir de cenário para cenário as emissões dos diferentes poluentes no domínio de estudo;

- Analisando agora parâmetros de desempenho do domínio de estudo, o aumento da taxa de penetração de VA aumentou a velocidade média dos veículos em toda a rede. Tendo a velocidade aumentado de cenário para cenário e atingido um aumento de 4,6% e 4,0% nos veículos convencionais e autocarros urbanos relativamente ao cenário base, respetivamente;

- Dado a velocidade média aumentar, é natural que o atraso relativo diminua, e verifica-se que à medida que a taxa de penetração de VA aumenta, o atraso relativo diminui consideravelmente nos diferentes veículos, demonstrando assim um aumento do desempenho da rede em cenários de penetração de VA;

- Analisando a velocidade média e atraso relativo apenas na VCI, verificou-se que a velocidade aumentou para uma taxa de penetração de VA de 10%, tendo depois diminuído e sido inferior ao cenário base quando a taxa de penetração de VA foi de 30%. Este facto é justificado pelo aumento do volume de tráfego nesta via, que naturalmente atingindo um determinado valor causa um aumento dos congestionamentos e consequente redução da velocidade média e aumento do atraso relativo médio. Apesar do aumento do número de veículos a circular na via, até uma taxa de penetração de 20%, a velocidade média aumentou e o atraso relativo médio diminuíram face ao cenário base, pelo que se pode concluir que os VA permitem um melhor desempenho das vias e uma melhor evacuação das mesmas (mesmo em casos com volumes de tráfego superiores);

- Assim os VA para além de apresentarem resultados promissores para futuros cenários de implementação de VA ao nível de critérios ambientais, visto o domínio de estudo apresentar um melhor desempenho a este nível, demonstram também que podem cumprir a necessidade dos viajantes de realizarem uma viagem num tempo inferior sem comprometer os critérios anteriores.

Este trabalho contribuiu para avaliar os efeitos da implementação de cenários de taxas de penetração de VA numa artéria com elevado volume de tráfego em termos de poluentes globais (CO₂) e locais (CO, NO_x e HC) e ainda em termos de desempenho de tráfego. Para além disso, permitiu identificar zonas sensíveis ao nível das emissões (em termos absolutos e por quilómetro) de forma a identificar zonas onde a mobilidade autónoma poderia ter menos benefícios. Pode-se concluir que com a penetração de VA numa rede de grande dimensão, estes diminuíram

consideravelmente as emissões dos diferentes poluentes e melhoraram o desempenho da rede, tendo sido capazes de aumentar a velocidade média, reduzir o atraso relativo e melhorar o fluxo de veículos ao longo da VCI. Os VA demonstram assim ser um tema de estudo de enorme interesse energético e ambiental.

Para finalizar, pode-se epilogar que os VA apresentam características que os tornam veículos com capacidades muito promissoras para cenários futuros.

Apesar da obtenção de resultados muito interessantes, este estudo foi realizado com algumas limitações, como: 1) dada a falta de dados, não foram tidos em conta veículos pesados de mercadorias nos volumes de tráfego; 2) os semáforos foram modelados com temporização fixa, o que não acontece no domínio de estudo (semáforos atuados), apesar destes tempos no processo de calibração poderem ficar próximos da realidade, será sempre uma aproximação; 3) dada a falta de tempo, apenas foram realizadas 15 repetições das diferentes rotas na análise da dinâmica do veículo, e, portanto, a calibração usou uma amostra com tamanho limitado; 4) a implementação dos VA foi apenas realizada numa via rápida e não em todo o domínio de estudo; 5) escolha de rotas estática ao invés da utilização de uma matriz OD.

Seguidamente são apresentadas algumas tarefas que podem ser exploradas em trabalhos futuros, nomeadamente:

- Estudar taxas de penetração de VA superiores a 50%;
- Estudar taxas de penetração de VA com a escolha dinâmica de rotas pelos veículos da rede;
- Analisar o impacto da velocidade na VCI nos VA em termos de emissões. Recentemente, o valor máximo da velocidade na VCI foi reduzido para 80 km/h, sendo que a sua diminuição se pode traduzir em impactos significativos dos VA na rede;
- Fazer uma análise de sensibilidade com diferentes percentagens de pesados de mercadorias e diferentes taxas de penetração de VA;
- Estender a implementação dos VA para todo o domínio de estudo;
- Avaliar o impacto de autocarros autónomos ao nível das emissões e do desempenho de tráfego através dos parâmetros de condução do modelo de tráfego;
- Aumentar a base de dados de campo através de novas campanhas de monitorização da dinâmica do veículo e autocarros, volumes de tráfego (por tipo de veículo) e ainda emissões (usando Sistemas Portáteis de Monitorização de Emissões) ao longo do domínio de estudo.

Referências Bibliográficas

- [1] AEA, "Energy In Europe - State of Play," Agência Europeia do Ambiente, Copenhaga, Dinamarca, 2017.
- [2] eurostat, "Final Energy Consumption, EU-28, 2015 (% Of Total, Based On Tonnes Of Oil Equivalent)," 4 Julho 2017. [Online]. Available: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Final_energy_consumption,_EU-28,_2015_\(%25_of_total,_based_on_tonnes_of_oil_equivalent\)_YB17.png](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Final_energy_consumption,_EU-28,_2015_(%25_of_total,_based_on_tonnes_of_oil_equivalent)_YB17.png). [Acedido em 5 de Abril de 2018].
- [3] AEA, "Final Energy Consumption By Sector And Fuel," Agência Europeia do Ambiente, Copenhaga, Dinamarca, 2017.
- [4] AEA, "Progress On Energy Efficiency In Europe," Agência Europeia do Ambiente, Copenhaga, Dinamarca, 2016.
- [5] eurostat, "Consumption Of Energy," 2017. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Consumption_of_energy. [Acedido em 10 de Abril de 2018].
- [6] eurostat, "Energy Consumption Of Transport, By Mode," 2016. [Online]. Available: <http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/table.do?tab=table&plugin=1&language=en&pcode=tsdtr250>. [Acedido em 10 de Abril de 2018].
- [7] eurostat, "Greenhouse Gas Emission Statistics - Emission Inventories," 2018. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Greenhouse_gas_emission_statistics&redirect=no. [Acedido em 6 de Abril de 2018].
- [8] AEA, "Greenhouse Gas Emissions From Transport," Agência Europeia do Ambiente, Copenhaga, Dinamarca, 2017.
- [9] AEA, "Passenger Transport Demand," Agência Europeia do Ambiente, Copenhaga, 2017.
- [10] AEA, "Transport Indicators Tracking Progress Towards Environmental Targets In Europe," Agência Europeia do Ambiente, Copenhaga, Dinamarca, 2016.
- [11] AEA, "Monitoring Progress Of Europe's Transport," Agência Europeia do Ambiente, Copenhaga, Dinamarca, 2016.
- [12] AEA, "Consumers Buying More Efficient Cars In Europe," Agência Europeia do Ambiente, Copenhaga, Dinamarca, 2013.
- [13] Comissão Europeia, "Reducing CO2 Emissions From Passenger Cars," [Online]. Available: https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/cars_en. [Acedido em 27 de Outubro de 2018].
- [14] Comissão Europeia, "Reducing CO2 Emissions From Vans," 2018. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/vans_en. [Acedido em 21 de Outubro de 2018].
- [15] AEA, "Do Lower Speed Limits On Motorways Reduce Fuel Consumption And Pollutant Emissions," Agência Europeia do Ambiente, Copenhaga, Dinamarca, 2011.
- [16] A. v. Benthem, "What Is The Optimal Speed Limit On Freeways?," *Journal of Public Economics*, vol. 124, pp. 44-62, 2015.
- [17] F. Zhenga, J. Lib, H. v. Zuylena e C. Lua, "Influence of driver characteristics on emissions and fuel," *Transportation Research Procedia*, vol. 27, pp. 624-631, 2017.

- [18] ITS PORTUGAL, "Intelligent Transport Systems & Services," ITS PORTUGAL, 2018. [Online]. Available: <http://www.its-portugal.com/its>. [Acedido em 20 de Abril de 2018].
- [19] USDOT, "Vehicle-To-Vehicle (V2V) Communications For Safety," Office Of The Assistant Secretary For Research and Technology - Intelligent Transportation Systems Joint Program Office, 2018. [Online]. Available: https://www.its.dot.gov/research_archives/safety/v2v_comm_safety.htm. [Acedido em 21 de Novembro de 2018].
- [20] USDOT, "Vehicle-To-Infrastructure (V2I) Communications For Safety," Office Of The Assistant Secretary For Research and Technology - Intelligent Transportation Systems Joint Program Office, 2018. [Online]. Available: https://www.its.dot.gov/research_archives/safety/v2i_comm_safety.htm. [Acedido em 21 de Novembro de 2018].
- [21] Comissão Europeia, "Europe on the Move - An Overview," *Harnessing The Benefits of Automation Connectivity and Smart Mobility Services*, p. 2, 31 de Maio de 2017.
- [22] J. M. Andersen, N. Kalra, K. D. Stanley, P. Sorensen, C. Samaras e O. A. Oluwatola, Technology, Autonomous Vehicle A Guide for Policymakers, Santa Monica, California, Estados Unidos da América: RAND Corporation, 2016.
- [23] C. Ross e S. Guhathakurta, "Autonomous Vehicles and Energy Impacts: A Scenario Analysis," *Energy Procedia*, vol. 143, pp. 47-52, 2017.
- [24] L. Tate, S. hochgreb, J. Hall e M. Basset, "Energy Efficiency of Autonomous Car Powertrain," SAE International, Cambridge, Inglaterra, 2018.
- [25] HLDI, "Predicted Availability Of Safety Features On Registered Vehicles - An Update," Highway Loss Data Institute, Arlington, Virginia, Estados Unidos da América, 2014.
- [26] U.S.E.I.A, "Autonomous Vehicles: Uncertainties and Energy Implications," U.S. Energy Information Administration, Washington, DC, Estados Unidos da América, 2018.
- [27] D. Krajzewicz, D. T. Boyom e P. Wagner, "Evaluation of the Performance of City-Wide, Autonomous Route Choice Based on Vehicle-to-Vehicle Communication," em *87º Encontro Anual Transportation Research Board*, Washington, DC, Estados Unidos da América, 2008.
- [28] T. Litman, "Autonomous Vehicle Implementation Predictions," Victoria Transport Policy Institute, Victoria, Austrália, 2018.
- [29] J. Hunt e J. Abraham, "Influences on Bicycle Use," *Transportation*, vol. 34, nº 4, pp. 453-470, 2007.
- [30] M. Amirgholy, N. Golshani, C. Schneider, E. J. Gonzales e H. O. Gao, "An Advanced Traveler Navigation System Adapted To Route Choice," *International Journal of Transportation Science and Technology*, vol. 6, nº 4, pp. 240-254, 2017.
- [31] A. B. P. Segadilha e S. d. P. Sanches, "Identification of Factors that Influence Cyclist's Route Choice," *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 160, pp. 372-380, 2014.
- [32] M. A. Abdel -Aty, R. Kitamura e P. P. Jovanis, "Using Stated Preference Data For Studying The Effect Of Advanced Traffic Information On Driver's Route Choice," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 5, nº 1, pp. 39-50, 1997.
- [33] E. Mitsakis, J.-M. S. Grau, E. Chrysohoou, I. Stamos e G. Aifadopoulou, "Multi-criteria route choice in road networks," Hellenic Institute of Transport, Grécia, 2015.
- [34] H. Alizadeh, C. Moreney, N. Saunier e B. Farooq, "Factors Affecting Driver's Consideration Set of Route Alternatives," em *97º Encontro Anual do Transportation Research Board*, Washington D.C., Estados Unidos da América, 2018.

- [35] J. Holden, H. V. T. Til, E. Wood, L. Zhu, J. Gonder e M. Shirk, "Trip Energy Estimation Methodology and Model Based on Real-World Driving Data for Green-Routing Applications," 97º Encontro Anual do Transportation Research Board, Washington D.C., Estados Unidos da América, 2018.
- [36] X. Lou, L. Cheng, D. Li, S. Zhu e J. Zhou, "Modeling Day-to-Day Dynamics of Travelers' Risky Route Choices under the Influence of Predictive Traffic Information," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2015.
- [37] J. Wang e H. Rakha, "Impact of Dynamic Route Information on Day-to-Day Driver Route Choice Behavior," em 94º Encontro anual do Transportation Research Board, Washington D.C., Estados Unidos da América, 2015.
- [38] Z. Zheng, S. Ahn e C. Monsere, "Impact of Traffic Oscillations On Freeway Crash Occurrences," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 42, nº 2, pp. 626-636, 2010.
- [39] T. Ueckermann e C. Venter, "International Experience With Road and Congestion Pricing And Options For Johannesburg," em 27º Southern African Transport Conference, Irene, África do Sul, 2008.
- [40] B. Urvi, C. Sekahr, Minal e M. Errampalli, "Impact Of Congestion Pricing On Mode Choice And Route Choice Behaviour: An Experimental Study Of Delhi," em 97º Encontro Anual do Transportation Research Board, Washington D.C., Estados Unidos da América, 2018.
- [41] J. M. Bandeira, P. Fernandes, T. Fontes, S. Pereira, A. J. Khattak e M. Coelho, "Exploring Multiple Eco-routing Guidance Strategies In Commuting Corridor," *International Journal of Sustainable Transportation*, vol. 12, nº 1, pp. 53-65, 2018.
- [42] J. Bandeira, C. Guarnaccia, P. Fernandes e M. Coelho, "Advanced Inpact Integration Platform for Cooperative Road Use," *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*, vol. 16, nº 1, pp. 1-15, 2016.
- [43] M. Cui e D. Levinson, "The Healthiest vs. Greenest Path: Comparing the Effects of Internal and External Costs of Motor Vehicle Pollution on Route Choice," 97º Encontro Anual do Transportation Research Board, Washington D.C., 2018.
- [44] T. Wong, N. Saxena e V. Dixit, "A Study of Route Choice Behavior of Drivers in Autonomous Vehicles," 97º Encontro Anual do Transportation Research Board, Washington D.C., Estados Unidos da América, 2018.
- [45] C. Schlereth, C. Eckert e B. Skiera, "Using Discrete Choice Experiments to Estimate Willingness-to-Pay Intervals," *Marketing Letters*, vol. 23, nº 3, pp. 761-776, 2012.
- [46] B. Liu, Q. Shi, Z. Song e A. E. Kamel, "Trajectory Planning for Autonomous Intersection Management of Connected Vehicles, Simulation Modelling Practice Theory," 2018.
- [47] H. Igliński e M. Babiak, "Analysis of the Potential of Autonomous Vehicles in Reducing the Emissions of Greenhouse Gases in Road Transport," *Procedia Engineering*, vol. 192, pp. 353-358, 2017.
- [48] M. Figueiredo, Á. Seco e A. B. Silva, "Calibration Of Microsimulation Models – The Effect Of Calibration – The Effect of Calibration Parameters Errors in the Model's," *Transportation Research Procedia*, vol. 3, pp. 962-971, 2014.
- [49] PTV, PTV VISSIM9 USER MANUAL, Karlsruhe, Alemanha: PTV, 2016, p. 1064.
- [50] L. Jie, H. V. Zuylen, Y. Chen, F. Viti e I. Wilmink, "Calibration of a microscopic simulation model for emission calculation," *Transport Research Part C - Emerging Technologies*, vol. 31, pp. 172-184, 2013.
- [51] J. J. Olstam e A. Tapani, Comparison of Car-following models, Linköping, Suécia: Swedish National Road and Transport Research Institute, 2004.

- [52] P. J. T. Fernandes, “Correlação de Variáveis Representativas de Segurança Rodoviária,” Dissertação de Mestrado, DEM, UA, Aveiro, 2010.
- [53] J. L. Jiménez-Palacios, “Understanding and Quantifying Motor Vehicle Emissions with Vehicle Specific Power and TILDAS Remote-Sensing,” Dissertação de Doutoramento no Instituto de Tecnologia de Massachusets, Massachusets, Estados Unidos da América, 1999.
- [54] APAEUA, “Methodology For Developing Modal Emission Rates For EPA's Multi-Scale Motor Vehicle And Equipment Emission System,” Assessment and Standards Division, Office of Transportation and Air Quality, Agência de Protecção Ambiental dos EUA, 2002, Estados Unidos da América, 2002.
- [55] D. O. Carvalho, “Escolha De Rotas - Influência Da Hora De Ponta Nos Consumos E Emissões,” Dissertação de Mestrado, DEM, UA, Aveiro, 2011.
- [56] O. Kolak, O. Feyzioğlu, Ş. Birbil, N. N. e S. Yalçındağ, “Using Emission Functions in modeling environmentally Sustainable Traffic Assingment policies,” *Journal of Industrial and Management Optimization*, vol. 9, nº 2, pp. 341-363, 2013.
- [57] A. R. Anya, N. M. Rouphail, H. C. Frey e B. Liu, “Method and Case Study for Quantifying Local Emissions Impacts of Transportation Improvement Project Involving Road Realignment and Conversion to Multilane Roundabout,” em *92º Encontro Anual do Transportation Research Board*, Washington, D.C., Estados Unidos da América, 2013.
- [58] M. C. Coelho, H. C. Frey, N. M. Rouphail, H. Zhai e L. Pelkmans, “Assessing Methods for Comparing Emissions from Gasoline and Diesel Light-duty Vehicles Based on Microscale Measurements,” *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 14, nº 2, pp. 91-99, 2009.
- [59] H. Zhai, H. C. Frey e N. M. Rouphail, “A Vehicle-Specific Power Approach to Speed and Facility-Specific Emissions Estimates for Diesel Transit Buses,” *Environmental Science & Technology*, vol. 42, nº 21, p. 7985–7991, 2008.
- [60] Base de Dados Portugal Contemporâneo, “População Residente: Total E Por Grandes Grupos Etários,” PORDATA, Porto, 2018.
- [61] ACAP, “Parque E Densidade Automóvel Em Portugal,” Associação Do Comércio Automóvel De Portugal, Portugal, 2015.
- [62] TomTom, “Traffic Index - Measuring Congestion WorldWide,” 218. [Online]. Available: https://www.tomtom.com/en_gb/trafficindex/city/porto. [Acedido em 28 de Outubro de 2018].
- [63] D. Carvalho, “C-Roads Portugal,” C-Roads, Lisboa, Portugal, 2017.
- [64] Wolfgang Kernstock, “C-Roads - Detailed Pilot Overview Report,” Wolfgang Kernstock, Viena, Austria, 2017.
- [65] IMT, “Relatório De Tráfego Da Rede Nacional De Autoestradas Do 2º Trimestre De 2016,” Instituto da Mobilidade e Transportes, Portugal, 2016.
- [66] Instituto Nacional de Estatística, “Inquérito À Mobilidade Nas Áreas Metropolitanas Do Porto E De Lisboa,” p. 22, 2017.
- [67] Sociedade De Transportes Colectivos Do Porto, “STCP,” 2018. [Online]. Available: <https://www.stcp.pt/pt/viajar/horarios/>. [Acedido em 12 de Maio de 18].
- [68] Andante, “Andante - Todos Os Transportes Na Sua Mão,” Transportes Intermodais do Porto, 2018. [Online]. Available: <http://www.linhandante.com/linhas.asp>. [Acedido em 13 de Maio de 2018].
- [69] IMT, “Relatório de Tráfego Na Rede Nacional de Autoestradas do 2º Trimestre de 2016,” Instituto da Mobilidade e Transportes, Lisboa, 2016.

- [70] R. Dowling, A. Skabardonise V. Alexiadis, "Traffic Analysis Toolbox Volume III: Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Software," *Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Estados Unidos da América*, vol. 3, p. 146, 2004.
- [71] D. Winnie, B. Christine e S. P., *Traffic Simulation and Data: Validation Methods and Applications*, Florida, Estados Unidos da América: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014.
- [72] emisia, "emisia conscious of transport's impact," COPERT Countries data, 2017. [Online]. Available: <http://emisia.com/products/copert-data>. [Acedido em 17 de Outubro de 2018].
- [73] C. Stogios, M. Saleh, A. Ganji, R. Tu, J. Xu, M. J. Roorda e M. Hatzopoulou, "Determining the Effects of Automated Vehicle Driving Behavior on Vehicle Emissions and Performance of an Urban Corridor," 97º Encontro Anual do Transportation Research Board, Washington, D.C., Estados Unidos da América, 2018.
- [74] L. Zhao e J. Sun, "Simulation Framework for Vehicle Platooning and Car-following Behaviors Under Connected-vehicle Environment," *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 96, pp. 913-924, 2013.
- [75] N. E. Lownes e R. B. Machemehl, "VISSIM: A multi-parameter sensitivity analysis," *Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference, WSC*, Monterey, California, Estados Unidos da América, 2006.
- [76] C.Lazar, A.Tiganasu e C.F.Caruntu, "Arterial Intersection Improvement by Using Vehicle Platooning and Coordinated Start," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, nº 9, pp. 136-141, 2018.

Anexos

Tabela A.1: Tempos de partida dos autocarros no sentido normal, em segundos [67].

	Tempos de Partida dos Autocarros em segundos									
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª	8ª	9ª	10ª
Linha 200	300	900	1800	3000	4500					
Linha 201	420	1200	1980	2760	3600	4500	5400			
Linha 202	600	1680	3000	4380						
Linha 203	300	1500	2700	4500						
Linha 204	0	720	1440	2160	3000	3900	4800			
Linha 205	1500	3300	5100							
Linha 206	60	1080	2100	3120	4140	5160	0			
Linha 207	0	780	1560	2400	3300	4200	5400			
Linha 208	1080	2520	3960							
Linha 209	600	3000	5400							
Linha 300	780	1800	2820	3840	4860					
Linha 301	900	2100	3300	4500						
Linha 302	720	1740	2760	3900	5340					
Linha 303	300	1200	2100	3000	3900	4800	5400			
Linha 304	0	1140	2340	3540	4740					
Linha 305	360	1080	1800	2520	3300	4200	5100			
Linha 400	420	1140	1860	2580	3300	4200	5400			
Linha 401	600	1320	2100	3000	3900	4800				
Linha 402	0	720	1440	2160	2880	3600	4500	5400		
Linha 500	60	780	1500	2220	3000	3900	4800			
Linha 501	360	1800	3240	4800						
Linha 502	240	1140	2040	3000	4080	5280				
Linha 503	1200	3300	5400							
Linha 504	780	1920	3060	4200						
Linha 505	0	1800	3600	4200						
Linha 506	0	1500	3300	5100						
Linha 507	0	1800	3600	5400						
Linha 508	240	960	1800	2700	3600	4500	5400			
Linha 600	240	840	1440	2040	2640	3240	3600	3960	4680	5400
Linha 601	780	2580	4380							
Linha 602	0	900	1800	2700	3600	4500	5400			
Linha 603	600	2400	4200							
Linha 604	0	1680	3480							
Linha 700	720	1680	2160	3840	4500					
Linha 700_V94	240	720	1200	1680	2160	2700	3240	3840	4500	5160
Linha 701	0	600	1200	1800	2400	3000	3720	4800		
Linha 702	300	900	900	1500	2100	2700	3300	4200	5400	
Linha 703	600	2400	4200							
Linha 704	300	960	1800	2700	3600	4500	5400			
Linha 800	60	780	1500	2220	2940	3660	4380	5100		
Linha 801	600	1320	2040	2760	3480	4200	5100			
Linha 803	900	2700	4500							
Linha 805	0	1800	3600	5400						
Linha 806	900	2100	3480	4800						
Linha 900	0	1440	3000	4500						
Linha 901	0	1200	2400	4200						
Linha 902	0	900	1800	2700	3600	4800				
Linha 903	360	1020	1680	2400	3300	4200	5100			
Linha 904	300	1200	2100	3000	3900	4980				
Linha 905	0	720	1440	2160	2880	3600	4500	5400		
Linha 906	600	1800	3300	5100						
Linha 907	0	1200	2400	3600	4800					
Linha ZR	0	1800	3600	5400						
Linha ZM	1500	3300	5100							
Linha ZF	900	2700	4500							
104 Resende	0	2100	3900							
119 Resende	1320	4560								

Tabela A.2: Tempos de partida dos autocarros no sentido inverso, em segundos [67].

	Tempos de Partida dos Autocarros Sentido Inverso em segundos							
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª	8ª
Linha 200	900	2100	3600	4800				
Linha 201	480	1680	2640	4020	5400			
Linha 202	300	1800	3300	4080	4800			
Linha 203	480	1680	2880	4500				
Linha 204	120	840	1680	2280	3000	3720	4500	5400
Linha 205	300	1200	2100	3600	5100			
Linha 206	660	1680	2700	3900	5100			
Linha 207	600	1320	2040	2820	3600	4500	5400	
Linha 208	1260	3000	4800					
Linha 209	300	2700	5400					
Linha 300	Linha Circular (Horário nas Partidas sentido normal)							
Linha 301								
Linha 302								
Linha 303	960	2160	3420	4620				
Linha 304	960	2160	3420	4620				
Linha 305	420	1140	1860	2580	3300	4200	5100	
Linha 400	480	1200	1920	2700	3600	4800		
Linha 401	0	900	1800	3000	4200	5400		
Linha 402	360	1200	2100	3000	4200	5400		
Linha 500	0	780	1560	2400	3300	4500		
Linha 501	1380	3000	4800					
Linha 502	120	840	1620	2400	3240	4080	4980	
Linha 503	1200	3600						
Linha 504	900	2100	3600	5400				
Linha 505	1500	3300						
Linha 506	720	2160	3600	5100				
Linha 507	900	2700	4500					
Linha 508	900	2700	4500					
Linha 600	2100	3900						
Linha 601	600	2400	4200					
Linha 602	900	2700	4500					
Linha 603	1200	3000	4800					
Linha 604	720	2100	3600	5100				
Linha 700	1080							
Linha 700_V94	1080	2460	3900					
Linha 701	720	3300	4920					
Linha 702	360	1260	2400	3600	5100			
Linha 703	600	2400	4200					
Linha 704	300	1200	2400	3600	4800			
Linha 800	60	780	1500	2400	3300	4500		
Linha 801	480	1200	1920	2700	3900	5100		
Linha 803	1200	3000	4800					
Linha 804	120	840	1560	2280	2940	4200		
Linha 805	900	2700	4500					
Linhas 806	900	2400	3900					
Linha 900	0	1500	3000	4500				
Linha 901	300	1800	3300	4800				
Linha 902	0	900	1800	2700	3600	4500		
Linha 903	600	1320	2040	2760	3600	4500	5400	
Linha 904	720	1800	3000	4200				
Linha 905	480	1200	1920	2640	3360	4200	5100	
Linha 906	900	2400	3900	5400				
Linha 907	0	900	1800	2700	3900	5100		
Linha ZR	0	1800	3600	5400				
Linha ZM	1500	3300	5100					
Linha ZF	900	2700	4500					
104 Resende	1020	3120	5220					
119 Resende	3000							

Tabela A.3: Resultados da calibração dos volumes de tráfego.

Nodo	Volume Observado (vph)	Volume Estimado (vph)	Diferença de Volume	GEH	GEH<4
4	1110	1176	5,95%	3,90	1
8	919	936	1,85%	1,12	1
12	1010	1025	1,49%	0,94	1
15	2268	2258	0,44%	0,42	1
18	1308	1318	0,76%	0,55	1
19	466	499	7,08%	3,00	1
22	851	912	7,17%	4,11	0
23	896	906	1,12%	0,67	1
24	765	728	4,84%	2,71	1
26	549	576	4,92%	2,28	1
28	1151	1177	2,26%	1,52	1
29	359	362	0,84%	0,32	1
33	1590	1655	4,09%	3,23	1
45	836	876	4,78%	2,73	1
46	1308	1258	3,82%	2,79	1
48	1256	1292	2,87%	2,02	1
49	693	648	6,49%	3,48	1
57	824	867	5,22%	2,96	1
62	891	847	4,94%	2,99	1
63	715	673	5,87%	3,19	1
72	554	559	0,90%	0,42	1
73	923	920	0,33%	0,20	1
76	830	620	25,30%	15,60	0
79	931	996	6,98%	4,19	0
89	1042	1244	19,39%	11,95	0
96	379	397	4,75%	1,83	1
103	1272	1319	3,69%	2,61	1

Tabela A.4: Resultados da validação dos volumes de tráfego.

Nodo	Volume Observado (vph)	Volume Estimado (vph)	Diferença de Volume
4	638	1069	67.52%
8	899	908	0.96%
12	1021	993	2.79%
15	2685	2278	15.16%
18	1314	1305	0.67%
19	380	485	27.55%
22	1449	887	38.80%
23	921	901	2.13%
24	845	801	5.21%
26	512	568	10.98%
28	1171	1156	1.28%
29	362	370	2.10%
33	1299	1629	25.42%
45	966	860	10.97%
46	1071	1267	18.28%
48	1274	1302	2.16%
49	750	643	14.29%
57	815	971	19.14%
62	872	856	1.83%
63	655	704	7.51%
72	436	522	19.79%
73	968	916	5.33%
76	806	766	4.93%
79	929	950	2.25%
89	1010	1229	21.64%
96	444	373	16.04%
103	1319	1306	1.00%

Tabela A.5: Comparação das emissões do cenário alternativo 1 relativamente ao cenário base e teste de significância com nível de significância 5%.

Simulação	Cenário Base	Cenário Alternativo 1	Cenário Base	Cenário Alternativo 1
	CO ₂ (g)		CO (g)	
1	23563023,79	23336617,76	38430,10	38663,46
2	24163478,13	23585974,2	39459,16	38818,21
3	24157129,96	23661300,25	39881,87	38889,63
4	23799375,06	23643637,82	38752,06	39088,92
Média	23920751,73	23556882,51	39130,80	38865,05
Desvio Padrão	253718,52	130184,90	571,48	152,93
P-value	0,0691		0,4661	
Simulação	NO _x (g)		HC (g)	
1	102029,31	102373,22	432150,84	456420,82
2	104476,86	103184,48	448778,38	456309,68
3	105727,19	103097,20	461501,40	448127,13
4	102948,07	103834,25	439473,74	462232,56
Média	103795,36	103122,29	445476,09	455772,55
Desvio Padrão	1417,15	517,81	10969,35	5022,27
P-value	0,4691		0,1898	
Simulação	CO ₂ (g/km)		NO _x (g/km)	
1	349,68	341,86	1,6653	1,6421
2	351,30	346,41	1,6425	1,6827
3	350,13	343,45	1,6687	1,6494
4	347,07	343,26	1,6253	1,6572
Média	349,54	343,74	1,6505	1,6579
Desvio Padrão	1,547	1,655	0,0177	0,0153
P-value	0,0044		0,6032	

Tabela A.6: Comparação das velocidades médias, atrasos relativos e densidades médias entre o cenário alternativo 1 e o cenário base, e teste de significância com nível de significância de 5%.

Simulação	Cenário Base	Cenário Alternativo 1	Cenário Base	Cenário Alternativo 1
	Velocidade Média Veículos Convencionais (km/h)		Velocidade Média Autocarros Urbanos (km/h)	
1	45,89	46,72	41,76	42,06
2	45,81	46,52	39,56	41,71
3	46,09	46,77	41,79	41,91
4	46,03	46,74	42,82	42,24
Média	45,96	46,69	41,48	41,98
Desvio Padrão	0,1093	0,0968	1,1889	0,1951
P-value	0,00013		0,4987	
Simulação	Atraso Relativo Veículos Convencionais		Atraso Relativo Autocarros Urbanos	
1	0,2086	0,1960	0,2032	0,1985
2	0,2097	0,1983	0,2152	0,2008
3	0,2033	0,1944	0,2042	0,2042
4	0,2050	0,1939	0,1931	0,1966
Média	0,2066	0,1957	0,2039	0,2000
Desvio Padrão	0,00260	0,00172	0,00780	0,00284
P-value	0,000881		0,442396	
Simulação	Densidade Veículos Convencionais		Densidade Autocarros Urbanos	
1	26,11	24,57	0,65146	0,68164
2	27,14	24,96	0,69054	0,68819
3	26,38	24,93	0,67641	0,67573
4	26,19	24,58	0,64863	0,66873
Média	26,45	24,76	0,66676	0,67857
Desvio Padrão	0,4095	0,1858	0,0175	0,0072
P-value	0,00062		0,32036	

Tabela A.7: Comparação das emissões do cenário alternativo 2 relativamente ao cenário base, e teste de significância com nível de significância 5%.

Simulação	Cenário Base	Cenário Alternativo 2	Cenário Base	Cenário Alternativo 2
	CO ₂ (g)		CO (g)	
1	23563023,79	23302049,69	38430,10	38645,31
2	24163478,13	23477310,55	39459,16	38053,17
3	24157129,96	23490171,89	39881,87	38597,75
4	23799375,06	23526275,13	38752,06	38340,78
Média	23920751,73	23448951,81	39130,80	38409,25
Desvio Padrão	253718,52	86692,62	571,48	235,98
P-value	0,02		0,09	
Simulação	NO _x (g)		HC (g)	
1	102029,31	102513,76	432150,84	459785,42
2	104476,86	101145,00	448778,38	426814,64
3	105727,19	102414,82	461501,40	448675,37
4	102948,07	101518,14	439473,74	432739,57
Média	103795,36	101897,93	445476,09	442003,75
Desvio Padrão	1417,15	582,57	10969,35	13011,84
P-value	0,0756		0,7359	
Simulação	CO ₂ (g/km)		NO _x (g/km)	
1	349,68	342,46	1,665	1,672
2	351,30	358,49	1,643	1,711
3	350,13	338,18	1,669	1,635
4	347,07	336,08	1,625	1,601
Média	349,54	343,80	1,651	1,655
Desvio Padrão	1,547	8,787	0,018	0,041
P-value	0,3076		0,8779	

Tabela A.8: Comparação das velocidades médias, atrasos relativos e densidades médias do cenário alternativo 2 com o cenário base, e teste de significância com nível de significância de 5%.

Simulação	Cenário Base	Cenário Alternativo 2	Cenário Base	Cenário Alternativo 2
	Velocidade Média Veículos Convencionais (km/h)		Velocidade Média Autocarros Urbanos (km/h)	
1	45,89	47,14	41,76	42,19
2	45,81	46,89	39,56	43,06
3	46,09	47,19	41,79	42,01
4	46,03	47,01	42,82	41,19
Média	45,96	47,06	41,48	42,11
Desvio Padrão	0,11	0,12	1,19	0,66
P-value	0,00002		0,453	
Simulação	Atraso Relativo Veículos Convencionais		Atraso Relativo Autocarros Urbanos	
1	0,209	0,190	0,203	0,191
2	0,210	0,193	0,215	0,189
3	0,203	0,187	0,204	0,189
4	0,205	0,190	0,193	0,197
Média	0,207	0,190	0,204	0,191
Desvio Padrão	0,003	0,002	0,008	0,0035
P-value	0,00015		0,047	
Simulação	Densidade Veículos Convencionais		Densidade Autocarros Urbanos	
1	26,11	23,47	0,65	0,67
2	27,14	24,28	0,69	0,64
3	26,38	23,64	0,68	0,69
4	26,19	23,59	0,65	0,64
Média	26,45	23,75	0,67	0,66
Desvio Padrão	0,4095	0,3149	0,02	0,02
P-value	0,00010		0,721	

Tabela A.9: Comparação das emissões para o cenário alternativo 3 relativamente ao cenário base, e teste de significância com nível de significância de 5%.

Simulação	Cenário Base	Cenário Alternativo 3	Cenário Base	Cenário Alternativo 3
	CO ₂ (g)		CO (g)	
1	23563023,79	23089486,43	38430,10	37877,06
2	24163478,13	23454456,55	39459,16	38619,97
3	24157129,96	23635314,66	39881,87	39295,18
4	23799375,06	23409212,58	38752,06	38197,19
Média	23920751,73	23397117,55	39130,80	38497,35
Desvio Padrão	253718,52	196728,76	571,48	530,66
P-value	0,03016		0,20909	
Simulação	NO _x (g)		HC (g)	
1	102029,31	100524,09	432150,84	440988,86
2	104476,86	102708,44	448778,38	456340,64
3	105727,19	104105,48	461501,40	468386,88
4	102948,07	101134,02	439473,74	435886,85
Média	103795,36	102118,01	445476,09	450400,81
Desvio Padrão	1417,15	1397,09	10969,35	12825,95
P-value	0,1946		0,6313	
Simulação	CO ₂ (g/km)		NO _x (g/km)	
1	349,68	337,66	1,6653	1,6507
2	351,30	340,50	1,6425	1,6683
3	350,13	339,22	1,6687	1,6505
4	347,07	334,83	1,6253	1,6095
Média	349,54	338,05	1,6505	1,6448
Desvio Padrão	1,547	2,112	0,0177	0,0216
P-value	0,0003		0,7358	

Tabela A.10: Comparação das velocidades médias, atrasos relativos e densidades médias entre o cenário alternativo 3 e o cenário base, e teste de significância com nível de significância de 5%.

Simulação	Cenário Base	Cenário Alternativo 3	Cenário Base	Cenário Alternativo 3
	Velocidade Média Veículos Convencionais (km/h)		Velocidade Média Autocarros Urbanos (km/h)	
1	45,89	47,58	41,76	42,12
2	45,81	47,26	39,56	42,15
3	46,09	47,28	41,79	42,61
4	46,03	47,29	42,82	42,76
Média	45,96	47,35	41,48	42,41
Desvio Padrão	0,1093	0,1289	1,1889	0,2797
P-value	0,00001		0,2359	
Simulação	Atraso Relativo Veículos Convencionais		Atraso Relativo Autocarros Urbanos	
1	0,2086	0,1808	0,2032	0,1889
2	0,2097	0,1859	0,2152	0,1939
3	0,2033	0,1849	0,2042	0,1851
4	0,2050	0,1931	0,1931	0,1973
Média	0,2066	0,1862	0,2039	0,1913
Desvio Padrão	0,00260	0,00443	0,00780	0,00463
P-value	0,000454		0,052148	
Simulação	Densidade Veículos Convencionais		Densidade Autocarros Urbanos	
1	26,11	22,34	0,65146	0,65628
2	27,14	22,87	0,69054	0,67781
3	26,38	22,74	0,67641	0,69109
4	26,19	22,21	0,64863	0,68027
Média	26,45	22,54	0,66676	0,67636
Desvio Padrão	0,4095	0,2746	0,0174	0,01262
P-value	0,00001		0,46962	

Tabela A.11: Comparação das emissões entre o cenário alternativo 4 e o cenário base, e teste de significância com nível de significância de 5%.

Simulação	Cenário Base	Cenário Alternativo 4	Cenário Base	Cenário Alternativo 4
	CO ₂ (g)		CO (g)	
1	23563023,79	22991042,58	38430,10	37092,41
2	24163478,13	23378191,26	39459,16	38342,92
3	24157129,96	23223603,49	39881,87	37669,04
4	23799375,06	23215431,65	38752,06	37309,54
Média	23920751,73	23202067,25	39130,80	37603,48
Desvio Padrão	253718,52	138015,85	571,48	473,99
P-value	0,0050		0,0119	
Simulação	NO _x (g)		HC (g)	
1	102029,31	98513,19	432150,84	412307,39
2	104476,86	101882,42	448778,38	448968,29
3	105727,19	100296,84	461501,40	427757,10
4	102948,07	99373,48	439473,74	416354,17
Média	103795,36	100016,48	445476,09	426346,74
Desvio Padrão	1417,15	1248,36	10969,35	14236,21
P- value	0,0134		0,1148	
Simulação	CO ₂ (g/km)		NO _x (g/km)	
1	349,68	345,99	1,67	1,84
2	351,30	346,26	1,64	1,82
3	350,13	340,42	1,67	1,77
4	347,07	340,38	1,63	1,77
Média	349,54	343,26	1,65	1,80
Desvio Padrão	1,55	2,86	0,02	0,03
P-value	0,0156		0,0003	

Tabela A.12: Comparação das velocidades médias, atrasos relativos e densidades médias entre o cenário alternativo 4 e o cenário base, e teste de significância com nível de significância de 5%.

Simulação	Cenário Base	Cenário Alternativo 4	Cenário Base	Cenário Alternativo 4
	Velocidade Média Veículos Convencionais (km/h)		Velocidade Média Autocarros Urbanos (km/h)	
1	45,89	48,19	41,76	43,54
2	45,81	47,96	39,56	43,09
3	46,09	48,07	41,79	42,60
4	46,03	48,09	42,82	43,39
Média	45,96	48,08	41,48	43,15
Desvio Padrão	0,11	0,08	1,19	0,36
P-value	0,0000		0,0585	
Simulação	Atraso Relativo Veículos Convencionais		Atraso Relativo Autocarros Urbanos	
1	0,21	0,17	0,20	0,17
2	0,21	0,18	0,22	0,18
3	0,20	0,17	0,20	0,18
4	0,20	0,17	0,19	0,18
Média	0,21	0,17	0,20	0,18
Desvio Padrão	0,00	0,00	0,01	0,00
P-value	0,0000		0,0037	
Simulação	Densidade Média Veículos Convencionais		Densidade Média Autocarros Urbanos	
1	26,11	20,41	0,65	0,62
2	27,14	21,09	0,69	0,65
3	26,38	20,79	0,68	0,65
4	26,19	20,62	0,65	0,63
Média	26,45	20,73	0,67	0,64
Desvio Padrão	0,41	0,25	0,02	0,02
P-value	0,0000		0,0884	